

UNA ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DEL RIESGO PARA PRODUCTORES DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EN EL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO.

POR:

JOSÉ DAVID ARIAS ROCHE

DOCUMENTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

ORIENTADOR:

HAROLD SALAZAR ISAZA, Ph.D

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
LÍNEA PLANEAMIENTO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
JUNIO 2013

ÍNDICE GENERAL

Lista de Figuras	iv
Lista de Tablas.....	v
Agradecimientos	vi
1. Introducción	1
2. Revisión del Estado del Arte	3
3. Modelo Conceptual de Mitigación del Riesgo.....	7
3.1. Portafolio óptimo clásico de Markowitz.....	7
3.2. Portafolio basado en predicción	12
3.3. Diseño de cobertura en mercados de futuros de electricidad	14
3.3.1. Cobertura cruzada.....	18
3.3.2. Cobertura directa.....	23
3.4. Herramienta de predicción de precios con redes neuronales	24
3.4.1. Modelo y arquitecturas de redes neuronales	25
3.5. Flujo grama de la propuesta	32
4. Resultados Numéricos.....	34
4.1. Predicción de precios.....	34
4.2. Estrategia de mitigación de riesgo	38
4.2.1. Marzo	38
4.2.2. Mayo.....	47
4.2.3. Junio	51
4.2.4. Comentarios generales acerca de los resultados numéricos.....	54
5. Conclusiones	56

6. Bibliografía	59
Anexos	62
A. Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex	62
A.1. Características de los contratos futuros de electricidad en Derivex.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Red neuronal de una sola entrada	26
Figura 3.2. Red neuronal con múltiples entradas.....	26
Figura 3.3. Red neuronal con múltiples entradas y neuronas	27
Figura 3.4. Red neuronal multicapa.....	28
Figura 3.5. Flujo grama de la propuesta	33
Figura 4.1. Comportamiento del precio real de bolsa y de la red neuronal durante el periodo del 31/01/2005-31/12/2011.....	36
Figura 4.2. Comportamiento del precio real del precio promedio de contratos y de la red neuronal durante el periodo del 31/01/2005-31/12/2011	37
Figura 4.3. Convergencia del precio de los futuros de marzo y el precio spot	47
Figura 4.4. Convergencia del precio de los futuros de mayo y el precio spot.....	51
Figura 4.5. Convergencia del precio de los futuros de junio y el precio spot.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Valores $RMSE$ de predicción de la red neuronal implementada	37
Tabla 4.2. Portafolio de Markowitz modificado periodo Marzo 2012.....	42
Tabla 4.3. Resultados periodo Marzo 2012 portafolio de Markowitz.....	42
Tabla 4.4. Portafolio basado en predicción periodo Marzo 2012	42
Tabla 4.5. Resultados periodo Marzo 2012 portafolio	42
Tabla 4.6. Cobertura directa y cruzada Marzo 2012	44
Tabla 4.7. Balance de las coberturas directa y cruzada Marzo 2012	45
Tabla 4.8. Portafolio de Markowitz modificado periodo Mayo 2012	48
Tabla 4.9. Resultados periodo Mayo 2012 portafolio de Markowitz.....	48
Tabla 4.10. Portafolio basado en predicción periodo Mayo 2012.....	48
Tabla 4.11. Resultados periodo Mayo 2012 portafolio.....	48
Tabla 4.12. Cobertura directa y cruzada Mayo 2012.....	49
Tabla 4.13. Balance de las coberturas directa y cruzada Mayo 2012	50
Tabla 4.14. Portafolio de Markowitz modificado periodo Junio 2012.....	52
Tabla 4.15. Resultados periodo Junio 2012 portafolio de Markowitz.....	52
Tabla 4.16. Portafolio basado en predicción periodo Junio 2012	52
Tabla 4.17. Resultados periodo Junio 2012 portafolio	52
Tabla 4.18. Cobertura directa y cruzada Junio 2012.....	53
Tabla 4.19. Balance de las coberturas directa y cruzada junio 2012.....	53
Tabla 0.1. Características de los contratos del mercado Derivex	63
Tabla 0.2. Liquidación financiera de precios y de garantía diaria en el mercado Derivex.....	63
Tabla 0.3. Balance de las pérdidas y garantías.....	66
Tabla 0.4. Balance del contrato de futuros sin liquidación diaria	67

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mis más sinceros agradecimientos al Ing. Harold Salazar, Ph.D por la dedicación y apoyo tanto académico como personal que me dio durante mi preparación profesional, gracias a sus enseñanzas y ejemplo, he podido desempeñarme profesionalmente, tanto en el ámbito investigativo y como en el laboral. Muchas gracias profesor Harold por ser mi principal formador.

Quiero igualmente agradecer a mi esposa, Catalina Castaño, por darme su apoyo en el proceso de mi formación académica, por la estabilidad emocional que me brinda, y por su paciencia por el tiempo invertido en la culminación de este trabajo.

Igualmente, quiero expresar mi agradecimiento hacia mi padre, José F Arias, ya que como padre me brindó todo su apoyo moral y económico para que mi proyecto de avanzar en mi desarrollo profesional no se viera truncado; a mi madre y hermanos, igualmente quiero agradecerles por su presencia y apoyo durante mi preparación académica.

Finalmente quiero dar las gracias a cada una de las personas que durante esta etapa de mi vida profesional me brindaron su apoyo incondicional y ayuda desinteresada, gracias profesores, compañeros de la Maestría en Ingeniería Eléctrica y mis amigos Camilo Gallego, Andrés Domínguez, Jesús Gómez, Carlos Saldarriaga y Luis M. Escobar.

1. INTRODUCCIÓN

En ambientes competitivos de mercados de electricidad los agentes participantes del mercado, como las compañías de producción de energía eléctrica y los comercializadores, se han visto expuestos a precio de electricidad altamente volátiles que podrían conllevar a un riesgo financiero (pérdidas) para estos agentes del mercado. Para mitigar ese tipo de riesgo se han creado instrumentos como los *forward* (o contratos bilaterales para el caso colombiano) y los mercados de derivados energéticos.

Aunque teóricamente se tienen instrumentos financieros libres de riesgo como los contratos bilaterales que son negociados por un comprador y un vendedor (los cuales negocian el precio de la energía, cantidad de la energía y duración del contrato), estos también enfrentan un incumplimiento por algunas de las partes del contrato conocido como riesgo de crédito. Igualmente, como las negociaciones de contratos bilaterales para atender demanda regulada se hace a través de convocatorias, se podría presentar el caso de no salir favorecido en la misma o que la cantidad de energía en la contratación bilateral sea inferior a la capacidad del generador. Por estas razones, parte de la energía del generador queda necesariamente expuesta a un riesgo en el mercado de muy corto plazo, también conocido como mercado spot. Es necesario entonces implementar estrategias de cobertura con instrumentos financieros (también ofrecidos por el mercado) tales como los mercados de derivados energéticos.

En este trabajo se implementa una estrategia de mitigación de riesgo para un generador de energía eléctrica que incluye una predicción de precio, un portafolio

de optimización en un horizonte de tiempo mensual que diversifica la participación de venta de energía eléctrica de un agente de generación y una cobertura a través del mercado de derivados energéticos Derivex. Esta estrategia no solo busca mitigar el riesgo sino que intenta maximizar el retorno de venta de energía del generador. La estrategia propuesta hace especial énfasis en el contexto Colombiano.

Para el portafolio, se utiliza la predicción de precios para estimar un retorno esperado y definir el riesgo del portafolio como el error de predicción. Una vez establecido el portafolio, se realiza una cobertura en el mercado de derivados energéticos. Esta cobertura es necesaria toda vez que cualquier herramienta de predicción presenta errores de estimación y estos errores se traducen en una exposición del generador en el mercado de corto plazo que es cubierta con instrumentos del mercado de derivados.

Los resultados numéricos muestran una estrategia eficiente en la construcción del portafolio y la estrategia de cobertura, indicando igualmente que la participación del generador en el mercado en tiempo real queda expuesta a la variación del precio de electricidad en un tiempo futuro, y el riesgo de esta variación de precio se puede cubrir por la utilización del mercado de futuros energéticos como estrategia de cobertura.

La organización de este trabajo es la siguiente: En el capítulo dos es realizada la revisión del estado del arte. El capítulo tres contiene la descripción de la metodología propuesta, la herramienta de predicción a través de redes neuronales y las características del mercado de derivados de *commodities* energéticos Derivex. El capítulo cuatro presenta los resultados numéricos del esquema propuesto. Finalmente, las conclusiones se presentan en el capítulo cinco.

2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Los agentes del sector eléctrico colombiano contaban exclusivamente con contratos bilaterales como instrumento de mitigación del riesgo antes de octubre de 2010. A partir de ese mes, cuentan con un nuevo instrumento financiero, implementado por el mercado de derivados estandarizados Derivex, que garantiza para todos los agentes el cumplimiento de diferentes operaciones y los protege de la volatilidad del precio de electricidad. Este mercado de derivados de commodities energéticos Derivex hasta el momento solo opera con contratos futuros de electricidad, donde sus participantes pueden tomar posiciones de venta o de compra de electricidad como estrategia de especulación o cobertura a través de liquidaciones financieras, siendo la estrategia de cobertura la más atractiva o la finalidad del uso de los derivados energéticos.

Por otro lado, un generador actualmente en el país tiene la posibilidad de construir un portafolio de venta de energía para un horizonte de tiempo mensual empleando contratos bilaterales o el mercado mayorista en tiempo real. Bajo este contexto, el problema del generador radica entonces en establecer cuanta energía dedica a cada una de estas posibilidades, de tal forma que se maximice el retorno y minimice el riesgo y con la posibilidad de acudir a un futuro de electricidad proporcionado por el mercado de derivados.

En la actualidad existen modelos teóricos que permiten encontrar la cantidad a destinar en cada alternativa por parte de un generador empleando todas las posibilidades de venta disponible. Algunas de las herramientas clásicas son: El teorema de los dos fondos, el teorema del fondo único, y el modelo de Markowitz. En ingeniería financiera, esta última técnica es ampliamente utilizada debido a que

es la base constructiva para diversos modelos de optimización de portafolios, además presenta una gran ventaja debido a que este modelo puede ser modificado a conveniencia del analista.

El tema de los portafolios ha sido un área de investigación de amplio estudio. Aunque inicialmente los estudios se habían centrado en el mercado de capitales, hoy día las metodologías desarrolladas para esos propósitos se han extendido a otro tipo de mercados, por ejemplo, el mercado de la electricidad.

En esa línea de investigación, se han destacados entre otros, los siguientes trabajos. En [1], [2] y [3] se resuelve un portafolio óptimo definiendo el retorno del portafolio a través del retorno de predicción y el riesgo del portafolio como la varianza y covarianza de los errores de predicción, en [4] se propone una etapa previa de minimización del error de la combinación de varias técnicas de predicción antes de la optimización del portafolio. En [5], se estudia la diferencia de los commodities financieros y los commodities de electricidad analizando la importancia de la gestión de riesgo en los mercados de electricidad a través de coberturas. En igual dirección, sobre teoría de coberturas a través de varios instrumentos financieros (especialmente futuros) se tienen los trabajos [6] y [7]. Aplicándose la teoría de coberturas en [8], los autores realizan un estudio estadístico aplicado a los mercados de futuros de electricidad usando dos tipos de estrategias de cobertura, cobertura directa y cobertura cruzada, el cual dispone futuros de energía. Los autores hacen una comparación de las estrategias de cobertura utilizadas para cuatro mercados de futuros de electricidad; California-Oregon Border (COB), Palo Verde (PV), Cinergy y Entergy. Un trabajo similar se tiene en [9] donde se realizan coberturas a través de futuros y se implementan medidas de riesgo como el VaR (value at risk) y el CVaR (conditional value at risk),

donde estas medidas de riesgo también son implementadas en [10], pero aplicadas al riesgo cuando se establecen contratos bilaterales entre un generador y un comercializador de energía. En [11] y [12] se utiliza teoría de media varianza para encontrar la frontera eficiente y determinar su retorno esperado para un nivel dado de riesgo, o determinar el riesgo para un retorno establecido aplicado a mercados competitivos de electricidad. Y en este mismo tema en [13] se establece un portafolio óptimo a través de la teoría de Markowitz, en el que los autores llevan el retorno y el riesgo a la función objetivo para maximizar el retorno y minimizar el riesgo siendo este ponderado con una aversión al riesgo. Los autores de [14] definen un portafolio de mediano plazo para una compañía de generación de energía donde incluyen costos de generación y tasas de indisponibilidad del generador. Y en [15] se hace una descripción de los conceptos y herramientas para la gestión de riesgo financiero aplicado a los actuales mercados mayoristas de electricidad.

El análisis de series de precios utilizado como predicción conocido como análisis técnico, también se ha extendido a los mercados de electricidad. En [16] se hace predicción de precios horarios a través de un híbrido de análisis de series de tiempo ARIMA y redes neuronales. Por otro lado, [17] y [18] realizar una predicción de precios horarios con redes neuronales. De los anteriores trabajos se observó que solo se obtenían predicciones de precios horarios, y hasta el momento en la literatura especializada pocos trabajos se han encontrado donde se reporte predicción de precios diarios o mensuales. En [19], los autores reporta algunas razones por la cuales es difícil obtener buenos resultados en la predicción de precios de electricidad y estas se deben principalmente a problemas en el análisis fundamental (conocimiento del mercado).

Por último, un portafolio de optimización con un horizonte de tiempo mensual y una estrategia de cobertura aplicada al mercado colombiano se presentará en este trabajo pues este tipo de estrategia no está reportada en la literatura especializada tal como se evidencia en la revisión del estado del arte. Para el portafolio, se implementará una metodología de predicción de precios para determinar el retorno esperado del portafolio y definir el riesgo del portafolio como el error de predicción, así mismo, se establecerá una posición de cobertura en el mercado de derivados energéticos para la participación en el mercado de electricidad en tiempo real. Se hará especial énfasis en la aplicación de esta metodología al contexto Colombiano.

3. MODELO CONCEPTUAL DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

La estrategia de mitigación de riesgo que se pretende diseñar para este trabajo comienza con el modelo clásico de portafolios de Markowitz el cual es llevado a un problema multi-objetivo, y seguidamente este problema se acondiciona para un portafolio basado en predicción. Después que se obtengan las cantidades óptimas de participación en bolsa y contratos, la idea es diseñar una cobertura para proteger la participación en bolsa ante la variación de precios.

Por lo anterior, la estrategia de mitigación de riesgo de este trabajo se dividirá en tres partes o etapas, a saber: 1) etapa de predicción donde se mostrará la arquitectura de pronóstico que se utilizará en este trabajo y que es necesaria para el portafolio basado en predicción, 2) Etapa donde se obtienen las cantidades óptimas de participación de bolsa y contratos a través de un portafolio basado en predicción, y 3) etapa de diseño de cobertura para la exposición en bolsa a través del mercado de commodities energéticos Derivex de Colombia.

3.1. *PORTAFOLIO ÓPTIMO CLÁSICO DE MARKOWITZ*

Para la construcción de un portafolio empleando el modelo de Markowitz se requiere el conocimiento del retorno de cada uno de los activos y el riesgo asociado a dicho retorno. Con estos valores, se determina la cantidad a invertir (compra o venta) en cada activo de tal forma que se maximice el retorno del portafolio o minimice el riesgo del portafolio. La construcción de un portafolio óptimo se hace a través del modelo de Markowitz [20] y [21]. Para el modelo de Markowitz es

necesario determinar el retorno esperado de cada uno de los activos que compone el portafolio dentro un periodo de tiempo. El retorno de un activo i en un instante de tiempo t , está dado por:

$$R_{i,t} = \frac{P_{i,t} - P_{i,t-1}}{P_{i,t-1}} \quad (3.1.1)$$

Donde $P_{i,t}$ es el precio promedio mensual del activo i del mes t , y $P_{i,t-1}$ es el precio promedio mensual del activo i en el mes $t-1$. El retorno esperado de un activo i se define como el promedio de la suma de los retornos de cada serie de tiempo (o de cada mes) como en (3.1.2).

$$\bar{R}_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N R_{i,t} \quad (3.1.2)$$

Donde \bar{R}_i es el retorno promedio del activo i en el mes $t+1$, N es el número de datos históricos y $R_{i,t}$ es el retorno del activo i generado en el mes t .

El retorno del portafolio es calculado a través de (3.1.3), donde m es el número de activos que componen el portafolio y X_i es la participación del activo i en el portafolio. Esta participación se expresa con un número entre 0 y 1.

$$R = \sum_{i=1}^m X_i \bar{R}_i \quad (3.1.3)$$

La medida clásica de riesgo de Markowitz corresponde al riesgo individual del activo y el riesgo combinado de los activos. El riesgo individual representa la varianza del retorno en el tiempo t con respecto al retorno promedio en $t+1$, matemáticamente:

$$v = \sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (R_{i,t} - \bar{R}_i)^2 \quad (3.1.4)$$

La covarianza, por otro lado, incorpora la multiplicación de la desviación del retorno del activo i en el tiempo t y su retorno promedio, con la desviación del retorno del activo j en el tiempo t y su retorno promedio, matemáticamente:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (R_{i,t} - \bar{R}_i)(R_{j,t} - \bar{R}_j) \quad (3.1.5)$$

Donde $R_{i,t}$ y $R_{j,t}$ son los retornos de los activos i y j en el tiempo t , \bar{R}_i y \bar{R}_j son los retornos promedios de los activos i y j , y N el número de datos históricos de la serie de tiempo. Por tanto, el riesgo del portafolio y del modelo de Markowitz estará dado por (3.1.6), matemáticamente:

$$V = \sum_{i=1}^m X_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m X_i X_j \sigma_{ij} \quad (3.1.6)$$

En (3.1.6) queda definido V como el riesgo del portafolio y en (3.1.3) el retorno del

portafolio, a través de estas dos ecuaciones se construye el modelo de Markowitz, donde se minimiza el riesgo V , sujeto a un retorno R deseado, donde dicho modelo presenta las características de un problema de programación cuadrática, matemáticamente:

$$\text{Minimizar } V = \sum_{i=1}^m X_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m X_i X_j \sigma_{ij} \quad (3.1.7)$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{i=1}^m X_i \bar{R}_i = R \quad (3.1.8)$$

$$\sum_{i=1}^m X_i = 1 \quad (3.1.9)$$

$$X_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, M \quad (3.1.10)$$

La ecuación (3.1.8) es la restricción que indica que cada participación X_i multiplicada por cada retorno promedio del activo i debe ser igual al retorno deseado, la ecuación (3.1.9) restringe a que la suma de cada participación porcentual X_i debe ser igual a la unidad, y la restricción (3.1.10) corresponde a la positividad de todas las variables X_i (desde i igual a uno hasta M que para este trabajo m solo toma el valor hasta dos activos), es decir, no se permite valores negativos porque estos corresponden a la filosofía de la ventas en corto [21]. En este trabajo se asume que el generador posee el activo (energía) entonces no se modela la posibilidad de venta en corto.

El modelo clásico mostrado en las ecuaciones (3.1.7) a (3.1.10) ha sido el más utilizado en la literatura especializada, donde se minimiza el riesgo sujeto a un retorno establecido. También se han presentado algunas variaciones donde se maximiza el retorno sujeto a un riesgo establecido. En este trabajo se pretende hacer una variación al modelo de Markowitz con el fin de adaptarlo al modelo de predicción y se utilizará un modelo con dos funciones objetivo, la minimización del riesgo y la maximización del retorno, y se llevan las dos funciones objetivos a una sola a través de unas ponderaciones, matemáticamente:

$$\text{Minimizar } -\gamma \sum_{i=1}^m X_i \bar{R}_i + \alpha \left(\sum_{i=1}^m X_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m X_i X_j \sigma_{ij} \right) \quad (3.1.11)$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{i=1}^m X_i = 1 \quad (3.1.12)$$

$$X_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, M \quad (3.1.13)$$

En el modelo (3.1.11), (3.1.12) y (3.1.13) se presenta el tipo de portafolio que se desea emplear en este trabajo, el cual es un problema de optimización cuadrática con dos funciones objetivos, siendo γ y α constantes positivas que ponderan las dos funciones objetivo como un problema mono-objetivo, y el retorno del portafolio se multiplica por un valor negativo debido a que se tiene un problema de minimización y se desea maximizar el retorno.

3.2. PORTAFOLIO BASADO EN PREDICCIÓN

El modelo de Markowitz parte del retorno esperado del portafolio y de la varianza y covarianza de los retornos de los activos del portafolio, los cuales son calculados con base a valores históricos. Puesto que en este trabajo se implementará una herramienta de predicción, no es necesario tener en cuenta el retorno esperado de los activos, la varianza y covarianza con base en datos históricos. Por el contrario, la herramienta de predicción es utilizada con el fin de estimar un retorno de acuerdo a la serie histórica de precios. Para incluir este enfoque alternativo, es necesario modificar el modelo de la sección anterior.

Considere que la herramienta de predicción estima el retorno esperado del activo i , con ello, el “riesgo” del activo i se define como el error de predicción del retorno del activo i . Con este error de predicción, la ecuación (3.2.1) muestra la “varianza” del activo i determinada con base en la herramienta de predicción. Dos cosas vale la pena anotar 1) La ecuación (3.2.1) no es propiamente la varianza del activo, se conserva el nombre para facilitar la comprensión del modelo de Markowitz, y 2) este enfoque se ha propuesto igualmente en [1], [2], y [3].

$$\hat{v} = \hat{\sigma}_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (R_{i,t} - \hat{R}_{i,t})^2 \quad (3.2.1)$$

En donde:

$$\hat{R}_{i,t} = \frac{\hat{P}_{i,t} - P_{i,t-1}}{P_{i,t-1}} \quad (3.2.2)$$

La ecuación (3.2.1) corresponderá al error de predicción del retorno del activo i (ya sea el retorno del precio de bolsa o del precio de contratos), N el número de datos históricos, y la ecuación (3.2.2) corresponde a la predicción del retorno del activo i en el tiempo t (o en el mes t), que se calcula a través de la predicción del precio del activo i (precio de bolsa o precio de contratos) en el tiempo t y el precio del activo i en el tiempo $t-1$. Ahora el portafolio incluirá la predicción de retornos del precio promedio mensual de bolsa de energía eléctrica y el precio promedio mensual de contratos de energía eléctrica, y el riesgo de error de predicción de cada uno de estos activos (precio de bolsa y de contratos) de acuerdo al modelo explicado en (3.1.11) a (3.1.13). No se incluirá la covarianza de error de predicción del precio de bolsa con el del precio de contratos debido a que las metodologías de predicción de un activo i (precio promedio mensual de bolsa) y j (precio promedio mensual de contratos) se harán de forma independiente, y no se tiene presente que un error de predicción del activo i esté correlacionado con el error de predicción del activo j , matemáticamente:

$$\text{Minimizar } -\gamma \sum_{i=1}^m X_i \hat{R}_i + \alpha \sum_{i=1}^m X_i^2 \hat{\sigma}_i^2 \quad (3.2.3)$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{i=1}^m X_i = 1 \quad (3.2.4)$$

$$X_i \geq 0, \quad i=1, \dots, M \quad (3.2.5)$$

El modelo mostrado en las ecuaciones (3.2.3) a (3.2.5) es el que se utilizará, en el cual se maximiza el retorno de predicción de los activos y se minimiza el error de

predicción de los retornos identificado como el riesgo del portafolio.

Hasta ahora se cuenta con herramienta de predicción que predice los precios de unos activos y que a partir de ésta se calcula la predicción de los retornos y su error de predicción que se desea incluir en el portafolio descrito en (3.2.3) a (3.2.5). Esta metodología se piensa implementar en el Mercado de Energía Eléctrica de Colombia, en el que se busca determinar cuanta capacidad debe destinar una compañía de generación de energía en la bolsa de energía (precio en tiempo real) y en contratos bilaterales de acuerdo a la predicción de los retornos de la bolsa y contratos, y el error de predicción.

Aunque con esta metodología el generador sabe cuánta capacidad va a destinar en contratos y en la bolsa, el generador quedará expuesto en la bolsa a un riesgo de variación de precio debido a que no sabrá cuál será al precio que venderá su energía en un periodo futuro. Por tal razón, en este trabajo se implementará el diseño de una cobertura a través de un mercado de futuros de electricidad, en el que su finalidad es proteger el precio del futuro de electricidad que se conoce hoy durante un periodo determinado.

3.3. DISEÑO DE COBERTURA EN MERCADOS DE FUTUROS DE ELECTRICIDAD

Los contratos futuros de energía eléctrica son instrumentos usados para cobertura, donde la estrategia es protegerse de la volatilidad de los precios de electricidad en tiempo real [8], [22]. Tales instrumentos financieros como los contratos futuros existen en el sector eléctrico colombiano desde octubre del año 2010 con un nuevo mercado de derivados estandarizados Derivex, y su objetivo es proteger a todos los agentes del mercado eléctrico de la volatilidad del precio de electricidad.

Este trabajo parte del punto de vista de un productor de electricidad, es decir, un generador eléctrico que desea vender energía en el mercado mayorista de electricidad en tiempo real durante un mes, y desea tomar una posición de cobertura a través de contratos de futuros de electricidad en el mercado de derivados de commodities energéticos Derivex, para cubrirse del riesgo de la volatilidad de los precios de electricidad y no con fines de generar dinero. Y para esto se explicaran dos tipos de metodologías de cobertura cruzada y directa que serán empleadas en este trabajo como propósito de comparación y determinar cuál sería la mejor metodología. Por eso antes de comenzar con los detalles de los tipos de coberturas se hará una breve explicación de los contratos de futuros de acuerdo como se exponen en [22].

Los contratos de futuros son acuerdos de compra y venta de un activo en particular para una fecha específica de entrega a un determinado precio, donde se realiza una liquidación financiera diaria con respecto al precio de futuros del día anterior hasta su vencimiento, y para el caso de que no se desee recibir o hacer entrega del activo se deberá hacer un cierre anticipado antes de la fecha de vencimiento y solo se realizaría una liquidación financiera.

Un cierre anticipado de una posición de venta o de compra, significa hacer lo contrario de lo que inicialmente se acordó hacer, es decir, si una de las partes del contrato toma una posición de venta en un contrato futuro cerrar la posición es tomar la figura de comprador y realizar una liquidación financiera entre el precio venta y de compra y no habría obligación de entrega.

En cambio, si una de las partes del contrato toma una posición de compra y cierra la posición antes del vencimiento igual como el caso anterior habría una liquidación financiera, que para este caso sería la diferencia entre el precio de

compra y el de venta. Por tanto estos contratos de futuros pueden ser utilizados por diferentes tipos de negociantes:

- Especuladores: Estos negociantes apuestan a que el precio del activo pueda subir o bajar, por lo tanto, este negociante al creer que el precio del activo en el mercado en tiempo real (mercado spot) y en el de futuros subirá en una fecha futura con respecto a la de hoy, él decidirá tomar una posición de compra en un contrato de futuros para obtener una ganancia, ya sea en el vencimiento de éste al vender el activo a un precio mayor en el mercado spot o al hacer un cierre de posición anticipado del contrato y hacer una liquidación financiera.

Y para el caso cuando el negociante cree que el precio del activo en el mercado spot y en el de futuros bajará con respecto al de hoy, él tomara una posición de venta para obtener su ganancia al comprar el activo a un precio menor en la fecha de vencimiento o hacer una liquidación financiera como en el caso anterior.

- Arbitrajistas: Estos negociantes intentan ganar dinero a través de las diferencias que puedan existir en el precio del activo en el mercado de futuros en su vencimiento y en el mercado spot. Por tanto, a continuación se explicará porque este tipo de estrategias de negociación hacen que el precio del activo en el mercado de futuros en su vencimiento converja con el precio spot.

En el caso de que en el vencimiento el precio del futuro sea mayor al del precio spot, el negociante podría hacer una ganancia al comprar el activo en el mercado spot y venderlo en el mercado de futuros, pero de acuerdo a la ley de oferta y demanda el precio del activo en el mercado de futuros podría bajar debido a la concentración de oferta de venta.

Y para el caso cuando en el vencimiento el precio del futuro es menor al precio spot, el negociante haría una ganancia al comprar el activo en el mercado de futuros y venderlo en el precio spot, y de nuevo por la ley de oferta y demanda el precio del activo en el mercado de futuros subiría por el exceso de ofertas de compra.

- Coberturistas: Este tipo de negociadores están interesados en proteger el precio del activo que deben adquirir o vender en el mercado spot con el precio de los contratos de futuros de hoy, con vencimiento en una fecha futura y cerrar la posición antes del vencimiento en el caso de que sea un mercado de futuros con entrega del activo. A continuación se explicará la estrategia de los coberturistas en mercados de futuros de liquidación financiera y sin obligación de entrega del activo.

Para el caso cuando un negociante necesita adquirir un activo, protegerá el precio de este con el precio del contrato de futuros de hoy tomando una posición de compra, y comprará el activo en el mercado spot en la fecha del vencimiento del contrato de futuros.

Sí en el caso que el precio de los futuros en el vencimiento fuese menor que el precio de futuros al inicio del contrato, se tendría una pérdida financiera en dicho mercado ya que compro alto y vendió más bajo. Y como el precio spot es muy cercano al precio de los futuros en el vencimiento, el negociante compraría el activo en el mercado spot a un valor casi igual al de los futuros en su vencimiento.

Por ende, el costo neto del activo estaría muy cerca al precio que el negociante decidió cubrir, porque la pérdida en el mercado de futuros más el costo del activo en el spot se acercaría al precio de la cobertura.

En cambio sí un negociante necesita vender un activo en un futuro y si se presenta las mismas condiciones del caso anterior, éste tendría una ganancia en el mercado de futuros al vender alto y comprar más bajo. Pero tendría una pérdida al vender el activo en el mercado spot porque éste también sería bajo ya que es muy cercano al precio de los futuros en su vencimiento.

Sin embargo, el valor neto al que se vendería el activo sería muy cercano al precio que deseaba cubrir debido a la ganancia en el mercado de futuros más lo recibido en el mercado spot.

En este trabajo el objetivo es negociar en el mercado de futuros como lo hacen los coberturistas que en este caso el negociador será una empresa productora de energía eléctrica (generador), donde el mercado spot será el mercado mayorista de energía eléctrica y el mercado de futuros será el mercado de derivados de commodities energéticos Derivex, ambos mercados de Colombia.

En que el diseño de la cobertura se hará para un periodo con duración de un mes, siendo esta la tercera etapa de la estrategia de mitigación de riesgo de este trabajo ante la variación de precios. Por ende, a continuación se seguirá con el tipo de metodologías para diseñar una cobertura como se mencionó anteriormente.

3.3.1. Cobertura cruzada

Tomar una posición de cobertura cruzada se utiliza cuando el generador desea obtener el valor óptimo de cobertura que le protegerá el precio de la energía al que

venderá en la bolsa durante un periodo de tiempo T con el precio de los contratos de futuros que conoce hoy, denotado como el tiempo $T-1$.

La ecuación (3.3.1) corresponde al flujo de caja por la energía vendida del generador en la bolsa durante el periodo T y la cobertura realizada. En la parte derecha de la ecuación se encuentra los ingresos del generador por haber vendido durante un tiempo T la cantidad de energía N_B (kWh) en la bolsa a un precio promedio $P_{B,T}$ (\$/kWh) y la liquidación financiera de la cantidad de energía negociada en el mercado de futuros N_F (kWh) multiplicada por la diferencia de los precios de los futuros en los tiempos $T-1$ y T .

$$N_B \mu = N_B P_{B,T} + N_F (P_{F,T-1} - P_{F,T}) \quad (3.3.1)$$

$$\mu = P_{B,T} + \frac{N_F}{N_B} (P_{F,T-1} - P_{F,T}) \quad (3.3.2)$$

$$b = \frac{N_F}{N_B} \quad (3.3.3)$$

Además, si se divide la ecuación (3.3.1) por la cantidad de energía N_B que se venderá en bolsa durante el periodo T obtenemos la ecuación (3.3.2), que será el valor de cobertura μ en función del precio promedio de bolsa y la relación de las cantidades de energía N_F y N_B multiplicada por la diferencia de precios de los futuros en los tiempos $T-1$ y T , si conjuntamente la relación de las cantidades N_F y N_B son reemplazadas por una razón o porcentaje de cobertura (3.3.3) finalmente se obtendrá la ecuación (3.3.4) igual como se formula en [8].

Por lo anterior, el precio mensual de bolsa en el tiempo (T) será el precio promedio al cual el generador vendería sus kilovatios hora durante un periodo en particular que para este trabajo se asumirá de un mes, y espera que al liquidar la diferencia de precios de los contratos de futuros en los tiempos $T-1$ y T más el precio promedio mensual de bolsa que se presenta en el tiempo T sea muy cercano al precio del contrato de futuros que se deseaba cubrir en el tiempo $T-1$.

$$\mu = P_{B,T} + b(P_{F,T-1} - P_{F,T}) \quad (3.3.4)$$

Se hace el reemplazo de la ecuación (3.3.3) en la (3.3.2) por comodidad para tener el valor de cobertura en función del porcentaje de cobertura y los precios de bolsa y del mercado de futuros como se muestra en (3.3.4), donde las variables son definidas como sigue. Para cada kilovatio-hora que el generador desea vender en la bolsa durante todo el tiempo T (que para este trabajo el tiempo T corresponde a un periodo mensual), b representa el porcentaje de kilovatio-hora que se utilizará como cobertura en el mercado de futuros, $P_{B,T}$ se denota como el precio promedio de bolsa en el tiempo T al cual el generador venderá cada kilovatio-hora. $P_{F,T-1}$ y $P_{F,T}$ son los precios del mercado de futuros Derivex en el tiempo $T-1$ y T respectivamente.

El objetivo de la cobertura de la ecuación (3.3.4) es que el precio al que se venderá la energía durante el periodo T sea igual al precio del mercado de futuros que se conoce en el tiempo $T-1$, y lo anterior se da por el siguiente comportamiento.

Como el precio de bolsa y el precio de los contratos de futuros en el tiempo T son muy cercanos, es el porcentaje de cobertura el que deberá ajustarse a un valor de tal manera que éste, multiplicado por el precio de futuros en el tiempo T se deberá

eliminarse con el precio de bolsa en el tiempo T , quedando el valor μ de cobertura igual al precio del mercado de futuros Derivex en el tiempo $T-1$.

Dos situaciones ilustran la forma como se puede lograr una cobertura. Para la primera, asuma que b es de valor uno, que el precio $P_{F,T-1}$ es mayor que los precios $P_{F,T}$ y $P_{B,T}$, y que el precio de bolsa a partir del tiempo $T-1$ a T se incrementó, como la diferencia de los precios de futuros es positiva y el precio promedio de bolsa es muy cercano al de los futuros en el tiempo T , la diferencia de los precios futuros $P_{F,T-1}$ y $P_{F,T}$ más el precio $P_{B,T}$ hacen que el valor μ sea muy cercano al valor $P_{F,T-1}$.

Para la segunda situación, asuma de nuevo que b tiene valor de uno, que el precio $P_{F,T-1}$ es menor que los precios $P_{F,T}$ y $P_{B,T}$, y que el precio de bolsa aumenta del tiempo $T-1$ a T , la diferencia de los precios futuros es negativa porque $P_{F,T-1}$ es menor que $P_{F,T}$, y como $P_{F,T}$ es muy cercano al precio $P_{B,T}$, de nuevo la diferencia de los precios de futuros y el precio $P_{B,T}$ hacen que el valor μ sea muy cercano al del $P_{F,T-1}$.

Por lo anterior, el valor porcentual de b será el encargado que la diferencia de los precios P_F de la ecuación (3.3.4) sumada con el precio $P_{B,T}$ sea un valor cercano al precio $P_{F,T-1}$. Debido a que el valor óptimo de b no es la unidad, por tal razón, se utiliza el modelo de mínima varianza para establecer el valor de b , esto es:

$$\mu = P_{B,T} - bP_{F,T} + bP_{F,T-1} \quad (3.3.5)$$

$$E[\mu] = E[P_{B,T}] - bE[P_{F,T}] + bP_{F,T-1} \quad (3.3.6)$$

$$Var[\mu] = \sigma_B^2 + b^2\sigma_F^2 - 2b\sigma_{BF} \quad (3.3.7)$$

Dónde:

$$\sigma_B^2 : \text{Varianza del precio de bolsa} \quad (3.3.8)$$

$$\sigma_F^2 : \text{Varianza del precio Derivex} \quad (3.3.9)$$

$$\sigma_{BF} : \text{Covarianza entre los precios} \\ \text{bolsa y Derivex} \quad (3.3.10)$$

En la ecuación (3.3.5) se separa los componentes de (3.3.4) para expresar el valor esperado de cada uno (donde $E[\mu]$ significa valor esperado de μ), donde el valor del precio Derivex en el tiempo $T-1$ es conocido, por tanto su valor esperado es el mismo como se muestra en (3.3.6). En dicha ecuación se observa que el valor esperado de los precios de bolsa y Derivex para el tiempo T son desconocidos y por tal razón son los que producen el riesgo o la incertidumbre de sus valores, por ende, el riesgo asociado de μ se debe a la varianza de la diferencia de los valores esperados de los precios de bolsa y Derivex en el tiempo T , ecuación (3.3.7).

$$b^* = \frac{\sigma_{BF}}{\sigma_F^2} \quad (3.3.11)$$

La varianza de (3.3.7) al ser minimizada su valor óptimo se encuentra fácilmente al derivar en función de b e igualar a cero, la ecuación (3.3.11) muestra el valor óptimo de cobertura que minimiza el riesgo asociado a la volatilidad de los precios de bolsa y Derivex. Cuando este valor óptimo de b tenga un valor negativo corresponde a que se tiene una cobertura en largo, es decir, tomar una posición de compra en el mercado de futuros a precio $T-1$ y cerrar la posición vendiendo a precio T antes de que el contrato deba ser entregado. Y cuando este valor óptimo de b sea positivo se tiene una cobertura en corto, lo cual significa tomar una

posición de venta en el mercado de futuros a precio $T-1$ y cerrar la posición comprando a precio T antes de que el contrato deba ser recibido.

3.3.2. Cobertura directa

Una cobertura directa o posición de cobertura completa para este trabajo significa que la cantidad de energía que el generador venderá en bolsa será la misma cantidad que pretende cubrir al precio de los futuros de electricidad. Debido a que en [22] se recomienda que cuando el precio subyacente del mercado de futuros es sobre el mismo precio del activo que se desea cubrir se debería realizar una razón de cobertura igual a la unidad. Evidentemente el valor de cobertura es el presentado en la ecuación (3.3.12), pero al tenerse un valor de porcentaje de cobertura igual a la unidad (3.3.13) se tiene que el valor o tarifa de cobertura μ que dependerá solo del valor del precio mensual de bolsa durante el periodo T y la diferencia de los precios de futuros en los tiempos $T-1$ y T , como se observa en (3.3.14).

$$\mu = P_{B,T} + b(P_{F,T-1} - P_{F,T}) \quad (3.3.12)$$

$$b = 1 \quad (3.3.13)$$

$$\mu = P_{B,T} + (P_{F,T-1} - P_{F,T}) \quad (3.3.14)$$

Por lo anterior, en la estrategia de cobertura se implementaran dos metodologías, la primera será la propuesta de los autores de [8], donde se toman los precios históricos del activo subyacente del futuro y el del mercado de derivados de commodities energéticos Derivex (mercado de instrumentos financieros energéticos que serán explicados en la sección 3.5) desde su inicio de negociación

hasta su fecha de vencimiento, y a los cuales se les calcula la varianza y la covarianza entre el precio spot y de futuros para determinar la posición de cobertura cruzada que minimiza la varianza de acuerdo a la ecuación (3.3.11) (cuyos precios serán tomados de [23]).

La otra estrategia es la sugerida en [22], la cual simplemente recomienda que cuando el activo subyacente del contrato de futuros es el mismo que el activo que se cubre es común utilizar una cobertura directa, la cual tiene un valor igual a la unidad.

Tanto la cobertura cruzada y directa explicadas anteriormente serán aplicadas al mercado de derivados de commodities energéticos Derivex en el capítulo de resultados con el fin de analizar cuál sería la más útil para el caso de este trabajo. Y en el anexo A se muestra su esquema de funcionamiento y liquidación diaria hasta el vencimiento de los contratos de futuros.

3.4. HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN DE PRECIOS CON REDES NEURONALES

La arquitectura o herramienta que se utilizará en este trabajo para la predicción de precios de energía eléctrica en la bolsa y en los contratos serán las redes neuronales. En el que solo se explicará la parte básica de las redes y la arquitectura particular que se utilizará para la predicción. Una forma más detallada sobre las redes neuronales se podrá encontrar en [24], [25] y [26]. Vale la pena indicar que esta breve presentación de las redes neuronales sigue las convenciones (gráficas y matemáticas) utilizadas en la referencia [25] pues esta referencia presenta un claro estudio, a juicio del autor de esta tesis, de las redes neuronales.

3.4.1. *Modelo y arquitecturas de redes neuronales*

Las redes neuronales se utilizarán como herramienta de predicción en el que el objetivo de la red es aprender el comportamiento de los precios de bolsa y de contratos a través de un entrenamiento en el que se desea tener una salida de predicción de acuerdo a unos patrones de entrada. Y dicho entrenamiento corresponde a la comparación de la señal de salida con respecto a la señal deseada para obtener un error. En que el objetivo será reducir dicho error hasta un valor establecido.

A continuación se empezará a detallar el esquema desde una red neuronal de una sola neurona y una sola capa en que se explicará su funcionamiento hasta llegar a las arquitecturas de múltiples neuronas y capas. Donde se especificará estas últimas arquitecturas y el algoritmo utilizado para reducir el error de predicción en estas arquitecturas.

En la figura 3.1 se tiene el esquema básico de una red neuronal que tiene una sola entrada p , siendo esta entrada multiplicada por un peso w y sumada con una ganancia b . Los anteriores sumandos corresponderán a la entrada neta n , que será evaluada en una función de transferencia f como se tiene en la ecuación (3.4.1). De lo anterior, se obtendrá una salida a de la neurona que será comparada con la señal deseada para determinar el error.

La finalidad de esta red será tener una salida de acuerdo a la entrada y reducir el error a través de un proceso iterativo hasta que se obtenga una tolerancia de error aceptable para la predicción que se desea realizar.

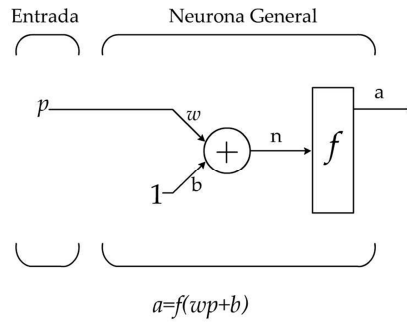


Figura 3.1. Red neuronal de una sola entrada

$$a = f(n) = f(wp + b) \quad (3.4.1)$$

Las redes neuronales también pueden tener varias entradas que se denota como \mathbf{p} en **negrilla** por ser un vector¹, y donde la suma de cada una de las entradas multiplicada por su respectivo peso del vector \mathbf{w} más la ganancia b , sería la entrada neta a la neurona (ver ecuación (3.4.2)). Este modelo es utilizado cuando se tienen varias entradas y se necesita una sola salida.

$$a = f(n) = f(\mathbf{Wp} + b) = f(w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b) \quad (3.4.2)$$

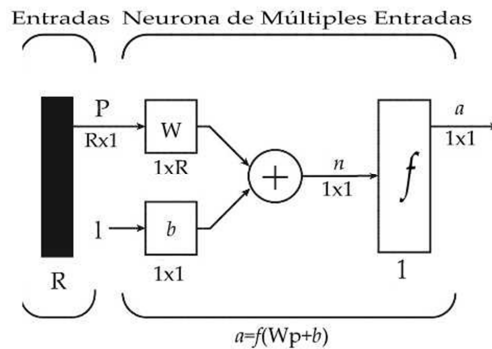


Figura 3.2. Red neuronal con múltiples entradas

¹ De aquí en adelante los vectores se denotarán en **negrilla** minúscula y las matrices en **negrilla** mayúscula.

Un esquema abreviado del modelo de la red neuronal con varias entradas se presentó en la figura 3.2, en el que se observa un vector de entrada p , un vector de pesos w , una ganancia b escalar, una entrada neta n escalar, una función de transferencia f y una salida a también escalar.

También hay modelos de redes neuronales con múltiples entradas y múltiples neuronas, este esquema abreviado se presenta en la figura 3.3. En el que se tiene un vector de entradas p , una matriz de pesos W , un vector de ganancias b , un vector de entrada neta n a cada neurona S , un vector de S funciones de transferencia y un vector de S salidas.

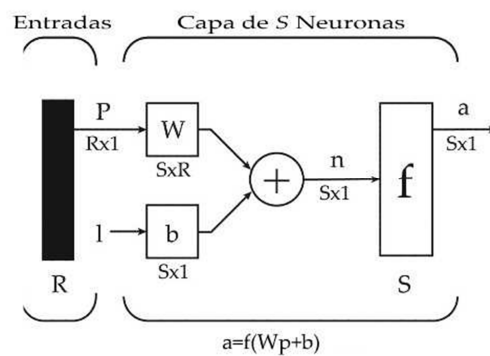


Figura 3.3. Red neuronal con múltiples entradas y neuronas

Por último se tiene un modelo de red neuronal de múltiples capas, con múltiples neuronas en cada capa, y múltiples entradas. Para este tipo de arquitecturas neuronales se tiene la notación de la ecuación (3.4.3), donde la letra R corresponde al número de entradas a la red, S el número de neuronas en cada capa y el superíndice numérico indicando el número de la capa de la red, que para este caso es una red neuronal de tres capas.

$$R - S^1 - S^2 - S^3 \quad (3.4.3)$$

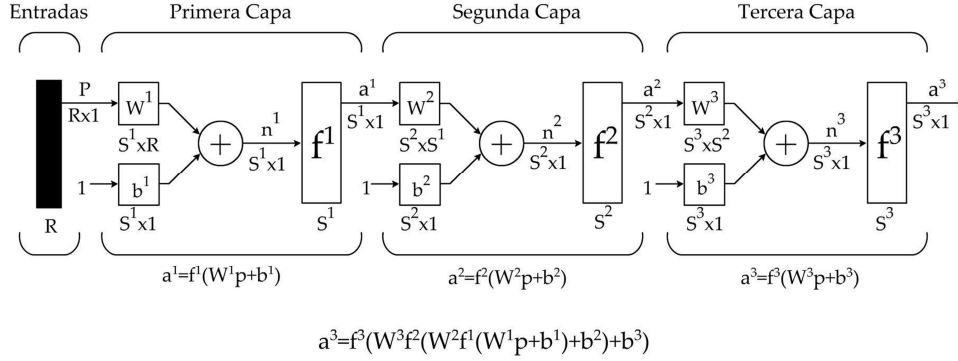


Figura 3.4. Red neuronal multicapa

La forma abreviada de las redes de tres capas se muestra en la figura 3.4. En que la salida de una capa se convierte en la entrada de la siguiente capa, el cual es el proceso que se describe en la ecuación (3.4.4), es decir, la entrada de la primera capa es el vector p , y el número de entradas para la segunda capa sería el mismo número de neuronas S^1 ya que son el mismo número de las salidas de la primera capa, y las entradas de la tercera capa sería también el número de neuronas de la segunda que está asociado al número de salidas de la segunda capa.

$$a^{m+1} = f^{m+1}(W^{m+1} a^m + b^{m+1}), \text{ para } m=0,1,\dots,M-1, \quad (3.4.4)$$

Siendo M el número de capas en la red y de acuerdo a la ecuación (3.4.4) la salida de la última capa de la red sería (3.4.5), teniendo en cuenta que si en la última capa se tiene una sola neurona la salida sería un escalar y no un vector que se muestra en la ecuación (3.4.5).

$$a = a^M \quad (3.4.5)$$

Después de mostrarse los esquemas de las arquitecturas de las redes neuronales se retoma lo comentado anteriormente, en que las redes tienen una salida de acuerdo a unas entradas, pesos y ganancias, pero el propósito de esto es tener una salida deseada (o *target* como se le acostumbra llamar), por ende, el objetivo al trabajar con las redes neuronales es comparar el valor de la salida con el valor deseado (*target*) y cuantificar el error de estos valores a través de la diferencia de estas mismas, y lograr que este error sea nulo o alcanzar una tolerancia de error a través de un proceso iterativo donde se cambian las magnitudes de los pesos y la ganancia de la capa de la red hasta que se pueda disminuir el error entre la señal de salida y la señal deseada.

Una de las formas de lograr la disminución del error en la señal de salida es a través de una técnica llamada error medio cuadrático, el cual está desarrollado y explicado en forma detallada en [25].

La manera de cómo se disminuye el error de la señal de salida en las redes neuronales es a través del algoritmo de mínimo error medio cuadrático *LMS* para los casos en que se tiene redes de una sola capa y una neurona. Y para disminuir el error de salida cuando se tienen arquitecturas de múltiples capas y múltiples neuronas es utilizado el algoritmo llamado *Backpropagation*, que se basa en la misma metodología del *LMS* (que también se podrá encontrar en forma detallada en [25]).

El algoritmo *Backpropagation* que es utilizado para la arquitectura particular de este trabajo es explicado de forma resumida. Que consiste en minimizar el error de predicción en cada iteración del entrenamiento al propagar el error desde la última capa hasta la primera por cada iteración.

Las arquitecturas neuronales que tienen múltiples capas y varias neuronas en todas las capas incluyendo la última, su salida será un vector en que cada una de ellas que estará en función de sus entradas a la capa, pero no de forma lineal sino de acuerdo a la función de transferencia de la capa que aplica para todas las neuronas de ésta. La ecuación (3.4.6) muestra la salida una capa particular que está en función de la entrada neta (3.4.7), todas estas llevadas en forma vectorial para poder adecuarlas a la ecuación de error cuadrático en forma vectorial, debido a que se tienen varias señales en la salida de cada capa.

$$\mathbf{a} = f(\mathbf{n}) \quad (3.4.6)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{W}\mathbf{p} + \mathbf{b} \quad (3.4.7)$$

Como en el entrenamiento de predicción se realiza un número k de iteraciones, para cada iteración se calcula la actualización de los pesos y de las ganancias, que se hace a través de la suma de dos términos, siendo el primer término el valor de la iteración anterior y el segundo término el nuevo valor que minimizan el error de predicción que se obtienen a través del algoritmo de optimización de la función de error. En este segundo término tanto para los pesos y ganancias, éste será el producto del gradiente, la tasa de aprendizaje y una sensibilidad de propagación de error de la capa posterior.

La propagación de los errores de predicción desde la última capa hasta la primera denominada algoritmo *Backpropagation* comienza en la penúltima capa. Es decir, en la última capa solo se calcula los nuevos valores de los pesos y ganancias incluyendo solo el error de predicción de esta capa. Y en la penúltima capa los cálculos de los nuevos valores de los pesos y ganancias de esta en la optimización del error de predicción, si lleva la sensibilidad del error de la capa posterior, el cual

sería el de la última capa. De esta manera es como a partir de la penúltima capa hasta la primera se propagaría los errores de predicción desde la última capa hasta la primera, en que la última capa no tiene propagación error y las demás si contienen la propagación de error, y sería así como se desempeña el algoritmo *Backpropagation* (de nuevo se aclara que para un detalle más profundo revisar en [25]).

Se aclara que para la predicción de los precios de bolsa y precios promedio de contratos en este trabajo antes de ser ingresados a la red neuronal, todos estos precios son llevados a un mapeo donde tomaran valores entre -1 y 1, ya que las funciones de transferencia de las redes neuronales de la arquitectura particular utilizada operan en ese rango de valores. En que dicho proceso de mapeo se hace a través de una función *mapminmax* (de *MATLAB*).

En la arquitectura neuronal utilizada para la predicción de precios el método de optimización que encuentra el error mínimo en el algoritmo *Backpropagation* es *Levenberg-Marquardt* donde se implementan dos capas, con tres entradas, cuatro neuronas en la primera capa con función de transferencia tangente hiperbólica sigmoidea, una neurona en la segunda capa con función transferencia lineal, y una sola salida. Este método de optimización es elegido del software implementado para la red neuronal (*MATLAB*) que para una explicación detallada de éste método de optimización se podrá encontrar en [26].

El desarrollo matemático de la formulación de las arquitecturas neuronales y los algoritmos presentados podrán ser revisados para una mejor explicación sobre redes neuronales en las referencias [24], [25] y [27], que fueron tomadas para el desarrollo de la arquitectura de predicción implementada.

Los resultados obtenidos de esta red neuronal se compararán con los de la referencia [17] a través de la raíz del error medio cuadrático (*RMSE* por sus siglas en inglés) que se muestra en la ecuación (3.4.8). Siendo esta medida de error útil para cuando se desea conocer el valor promedio en que se desviara la predicción del valor real. Esta medida se evaluará en la etapa de validación o de predicción de la red neuronal y no en la etapa de entrenamiento.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \hat{p}_i)^2} \quad (3.4.8)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} p_i &: \text{Precio real en el periodo } i \\ \hat{p}_i &: \text{Predicción de precio en el periodo } i \\ n &: \text{Número de periodos } n \end{aligned} \quad (3.4.9)$$

Esta comparación se hace con el fin de mostrar la fortaleza del portafolio basado en predicción de la sección 3.2 cuando se tiene una buena herramienta de pronóstico con respecto al modelo clásico de Markowitz que se presentó en la sección 3.1.

3.5. FLUJO GRAMA DE LA PROPUESTA

Luego de explicar el modelo conceptual de este trabajo en las secciones anteriores, en esta sección se resume la propuesta de este trabajo en un flujo grama (figura 3.5). La metodología parte con la etapa de predicción a través de las redes neuronales y con esta red se calculan los retornos que serán necesarios para la construcción del portafolio propuesto. Finalmente, la participación en bolsa que

establece el portafolio, es cubierta a través de los contratos de futuros de electricidad.

Es importante aclarar que el orden del flujo-grama corresponde al orden en que debe ser implementada esta propuesta, si bien la presentación de las componentes individuales no se realizó en el mismo orden en este capítulo. La razón de ello es que por efectos pedagógicos es mejor presentar inicialmente el portafolio basado en predicción que la predicción de precios por parte de la red.

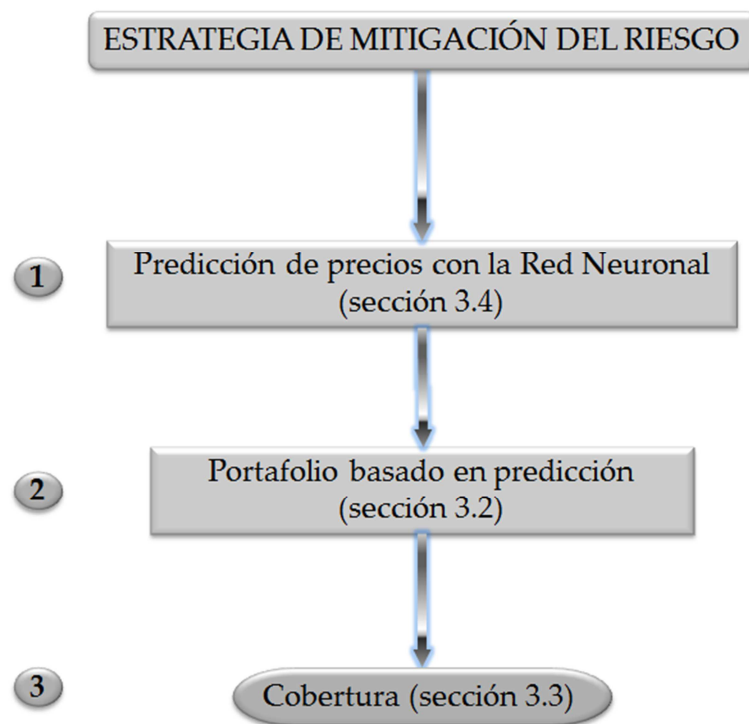


Figura 3.5. Flujo grama de la propuesta

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

En este capítulo se muestran los resultados numéricos de la estrategia de mitigación de riesgo para el caso de un generador, estrategia que es obtenida a partir de la predicción de precio de una red neuronal, del portafolio basado en predicción y la estrategia de mitigación de riesgo para la exposición en la bolsa.

Para la cobertura, se asume que el estudio se aplica para un generador con una capacidad de 50 MW o una planta hidráulica de mayor capacidad que tenga bajos factores de planta. Y que la capacidad de potencia (MW) despachada en la bolsa y en los contratos será constante durante las 24 horas todos los días del mes bajo estudio.

Este supuesto se hace debido a que en un contrato de futuros de electricidad se debe tener certeza de la energía que se desea cubrir, y también se hace con el fin de mostrar que cuando se conoce completamente la energía que se necesita cubrir, estos contratos de futuros son muy eficientes. Vale la pena indicar que la cobertura propuesta en este trabajo es válida para cualquier generador de energía eléctrica de diferente tecnología y recurso primario, solo se deberá tener claro cuánta es la cantidad de energía que venderá durante la duración de la cobertura. Que para este trabajo se utilizarán coberturas en el mercado de futuros para periodos mensuales.

4.1. PREDICCIÓN DE PRECIOS

En la etapa de predicción se utiliza una red neuronal para los precios mensuales de bolsa y otra para los precios promedio mensual de contratos. El algoritmo

utilizado fue el de propagación hacia atrás implementado en una arquitectura neuronal multicapa *Backpropagation* utilizando el método de optimización *Levenberg-Marquardt* para la minimización del error medio cuadrático como en [16] y [17].

En cada red neuronal las entradas son datos históricos de precios P_{t-3} , P_{t-2} , P_{t-1} y la salida es el precio P_t , es decir, para predecir los precios mensuales de bolsa y de contratos para el mes de marzo del año 2012, los precios mensuales históricos de entrada serían los meses de diciembre de 2011, enero y febrero del año 2012. Los datos históricos que se utilizaron para el entrenamiento de la herramienta de predicción de precios mensuales de bolsa y precios promedio de contratos del mercado eléctrico colombiano (precios tomados de [28]), corresponden al periodo que van desde el 31/01/2000 al 31/12/2011, y cada uno de estos precios fueron llevados a su valor real para el año 2012 a través de la variación anual del IPC desde el año 2000 hasta el 2011 (datos IPC tomados de [29]).

Después de haberse tenido claro el periodo de los datos históricos, a estos se les hace un procedimiento de mapeo donde solo toman valores en un intervalo de -1 a 1, se separan los datos de tal forma que el 90% se destinan como entradas para el entrenamiento de la red neuronal, y el 10% como entradas para el periodo de validación o predicción.

Para la arquitectura de la red neuronal se utilizó una sola capa oculta con 4 neuronas, una función de transferencia *tansigmoidal* con una salida en un intervalo -1 a 1, y una función de transferencia *lineal* en la salida. Para las especificaciones de entrenamiento se realizó un proceso iterativo de 500.000 épocas, una tasa de aprendizaje de 0,01 y un error de entrenamiento de 0,001. La descripción anterior

de la red neuronal se utilizó tanto para la predicción del precio mensual de bolsa y el precio promedio mensual de contratos.

En la figura 4.1 se muestra el proceso de entrenamiento y predicción para el precio mensual de bolsa, en la cual se puede observar que la línea continua corresponde a los precios de bolsa de la red neuronal dentro del tiempo de entrenamiento, la línea continua en negrilla con rombos corresponde al tiempo de predicción de la red, y siendo la línea discontinua el precio real de bolsa dentro del tiempo de entrenamiento y de predicción. También se puede apreciar que la red logra seguir la tendencia o la volatilidad del precio de bolsa, obteniéndose una buena predicción del precio de bolsa por parte de la red neuronal.

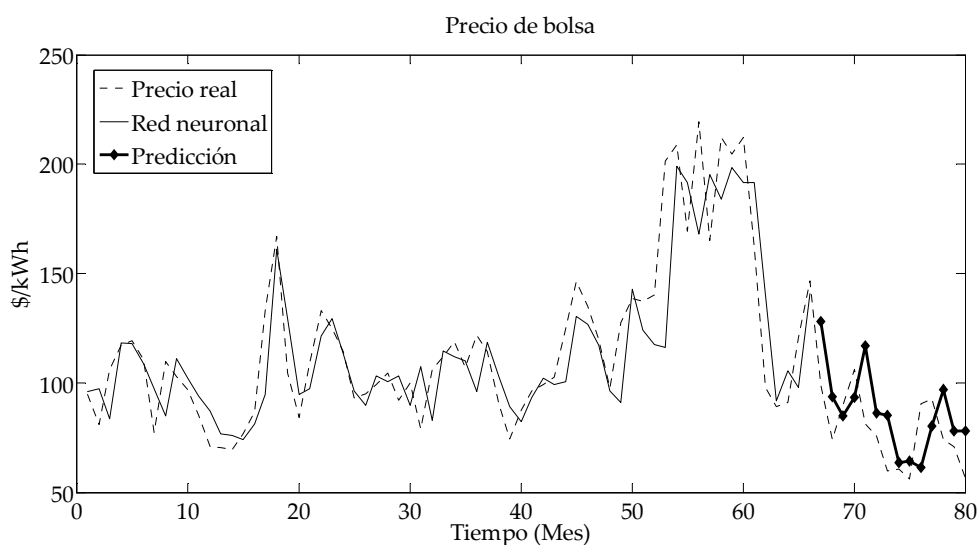


Figura 4.1. Comportamiento del precio real de bolsa y de la red neuronal durante el periodo del 31/01/2005-31/12/2011

Y para la figura 4.2 la línea discontinua corresponde al precio real de precio promedio de contratos, la línea continua a la red neuronal dentro del periodo de entrenamiento y la línea continua en negrilla con rombos corresponde a la predicción de la red. En esta figura también se aprecia que la red neuronal logra

seguir el comportamiento y la tendencia de los precios, donde dicha tendencia es menos volátil que el precio de bolsa, de lo cual se puede inferir que la predicción de los precios promedio de contratos es más precisa que la predicción de los precios de bolsa. Por otro lado, en la tabla 4.1 se encuentra la raíz del error medio cuadrático de cada una de las predicciones, en la que se observa que para los precios de bolsa se obtuvo un error mayor comparado con los precios promedio de contratos.

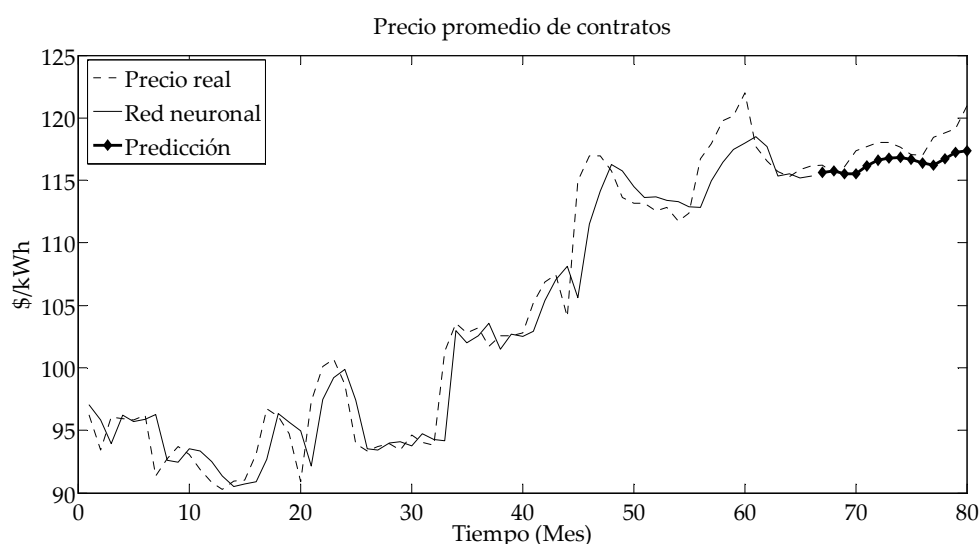


Figura 4.2. Comportamiento del precio real del precio promedio de contratos y de la red neuronal durante el periodo del 31/01/2005-31/12/2011

TABLA 4.1. VALORES *RMSE* DE PREDICCIÓN DE LA RED NEURONAL IMPLEMENTADA

	Predicción precio de bolsa	Predicción precio de contratos
<i>RMSE</i>	19,9091 \$/kWh	1,6341 \$/kWh

Obtenido el entrenamiento de la red neuronal, la siguiente etapa corresponde a la del portafolio basado en predicción, donde la red neuronal es utilizada para determinar el retorno de predicción y los errores de predicción de retorno, con el

fin de determinar la cantidad óptima de capacidad que se venderá en la bolsa y en contratos.

4.2. ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

Después de obtenerse el entrenamiento de las redes neuronales para la predicción del precio mensual de bolsa y el precio promedio mensual de contratos, se dispone hacer el cálculo correspondiente a los retornos para diferentes periodos, donde se mostraran los resultados del portafolio para los meses marzo, mayo y junio del año 2012, ya que estos precios eran los últimos que se encontraban disponibles cuando se realizaron los resultados numéricos de éste trabajo.

Se eligieron porque el precio de los futuros del mercado Derivex presentaron diferentes comportamientos y se desea analizar su impacto en la estrategia de mitigación. No se consideraron los precios de abril pues ese mes presentó el mismo comportamiento que el mes de mayo. Así mismo, igual se incluye el análisis del modelo de Markowitz con retornos basados en promedios históricos (este modelo se llamara Markowitz modificado y es comúnmente empleado en la literatura) con el fin de comparar sus resultados con el modelo basado en predicción.

4.2.1. Marzo

4.2.1.1. Portafolio

Los resultados del portafolio de Markowitz modificado, se calculan a través de los datos históricos de los retornos de los precios de bolsa y precios promedios de contrato desde el 31/01/2000 hasta el 29/02/2012 para el caso del mes de marzo, y para los siguientes periodos de estudio los datos históricos serán aumentados

hasta el periodo anterior del periodo de estudio, es decir, para los resultados del portafolio de Markowitz modificado del mes de mayo el cálculo se hará desde los retornos de los precios mencionados anteriormente desde el 31/01/2000 hasta el 30/04/2012, y así sucesivamente serán aumentados los datos históricos para los demás periodos de estudio.

En el primer mes de estudio se inicia con el portafolio de Markowitz modificado, que se muestran en la tabla 4.2; encontramos el retorno promedio de los precios mensuales de la bolsa y de los precios promedio mensuales de contratos de energía eléctrica para el mes de marzo del año 2012, y en la penúltima fila de la tabla 4.2 se observa la varianza de los retornos, también conocido como el riesgo del portafolio, donde dicho riesgo para los contratos presenta un varianza muy pequeña comparada al de la bolsa.

En la tabla 4.3 se presentan los resultados de la solución del modelo presentado en las ecuaciones (3.1.11), (3.1.12) y (3.1.13), el cual fue resuelto a través del solver de *Matlab* para optimización cuadrática llamado *quadprog*. Donde la variable “ X_1 ” corresponderá a la participación en bolsa y “ X_2 ” a la participación en contratos.

Los resultados de la tabla 4.3 muestran que cuando se deja fijo el ponderador del retorno del portafolio $\gamma=1.0$ y se varia el ponderador de la sensibilidad con respecto al riesgo del portafolio a través de 11 valores discretos de uno hasta cero, la participación en contratos empieza a disminuir a medida que disminuye el peso del ponderador o la aversión al riesgo, debiéndose principalmente a que el valor esperado del retorno en la bolsa es superior al de los contratos. Por el contrario, cuando se deja fijo el ponderador del riesgo del portafolio $\alpha=1$, la participación de los contratos empieza a aumentar a medida que se le disminuye peso al retorno del portafolio.

Los resultados de la predicción se presentan en la tabla 4.4, y se observa que los retornos de predicción perciben las caídas de los precios como se observó en las figuras 4.1 y 4.2, algo que no ocurre con los retornos promedio del modelo de Markowitz modificado mostrados en la tabla 4.2. De acuerdo a estos resultados se puede inferir que el modelo de Markowitz modificado al basarse en el comportamiento promedio de los datos históricos no muestra la realidad para este caso, y de esta manera cobra importancia el modelo del portafolio basado en predicción.

La tabla 4.5 muestra los resultados del portafolio basado en predicción, donde la predicción se hace a través de la red neuronal. Se observa que la participación que cuando se fija el ponderador de retorno ($\gamma=1.0$) y se varía las ponderaciones de sensibilidad del riesgo de predicción, la participación en bolsa es completa y en contratos es nula. Y para el caso cuando se fija el ponderador de riesgo de predicción ($\alpha=1$) y se varía las ponderaciones de sensibilidad del retorno, la participación en bolsa empieza a disminuir de la unidad a partir de $\gamma=0.3$ hasta $\gamma=0$.

Los resultados presentan ese comportamiento principalmente debido a que el retorno de predicción en la bolsa es superior que al de los contratos y por tal razón la participación en contratos será nula, caso contrario ocurre cuando la sensibilidad del retorno es nula y debido a que el error de predicción de retornos en los contratos es menor.

Para establecer la cobertura ante la exposición en la bolsa en el periodo de estudio de los resultados anteriores, primero se debe establecer el valor de los ponderadores para determinar los porcentajes de capacidad que irán destinadas a cada posibilidad de venta del portafolio, para ello se elige que el ponderador de

riesgo se debe fijar ($\alpha=1$) ya que el objetivo es mitigar riesgo y el ponderador de retorno será $\gamma=0.5$ igual como se encuentra en [3].

TABLA 4.2. PORTAFOLIO DE MARKOWITZ MODIFICADO PERIODO MARZO 2012

	Bolsa	Contratos
Retorno promedio	0,0171	0,0029
Varianza retornos	0,0342	0,0005
Covarianza retornos	0,0015	

TABLA 4.4. PORTAFOLIO BASADO EN PREDICCIÓN PERIODO MARZO 2012

	Bolsa	Contratos
Predicción de precio	89,22 \$/kWh	119,09 \$/kWh
Predicción de retorno	0,1370	-0,0280
Varianza de error predicción retornos	0,0305	0,0005

TABLA 4.3. RESULTADOS PERIODO MARZO 2012 PORTAFOLIO DE MARKOWITZ MODIFICADO CON DIFERENTES PONDERACIONES

SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RIESGO			SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RETORNO		
$\gamma=1,0$			$\alpha=1,0$		
α	X_1	X_2	γ	X_1	X_2
1	0,1905	0,809	1	0,1905	0,8095
0,9	0,2153	0,7847	0,9	0,1681	0,8319
0,8	0,2463	0,7537	0,8	0,1458	0,8542
0,7	0,2862	0,7138	0,7	0,1235	0,8765
0,6	0,3394	0,6606	0,6	0,1011	0,8989
0,5	0,4138	0,5862	0,5	0,0788	0,9212
0,4	0,5255	0,4745	0,4	0,0565	0,9435
0,3	0,7116	0,2884	0,3	0,0341	0,9659
0,2	1,0000	0,0000	0,2	0,0118	0,9882
0,1	1,0000	0,0000	0,1	0,0000	1,0000
0	1,0000	0,0000	0	0,0000	1,0000

TABLA 4.5. RESULTADOS PERIODO MARZO 2012 PORTAFOLIO BASADO EN PREDICCIÓN CON DIFERENTES PONDERACIONES

SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RIESGO DE PREDICCIÓN			SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RETORNO		
$\gamma=1,0$			$\alpha=1,0$		
α	X_1	X_2	γ	X_1	X_2
1	1,0000	0,0000	1	1,0000	0,0000
0,9	1,0000	0,0000	0,9	1,0000	0,0000
0,8	1,0000	0,0000	0,8	1,0000	0,0000
0,7	1,0000	0,0000	0,7	1,0000	0,0000
0,6	1,0000	0,0000	0,6	1,0000	0,0000
0,5	1,0000	0,0000	0,5	1,0000	0,0000
0,4	1,0000	0,0000	0,4	1,0000	0,0000
0,3	1,0000	0,0000	0,3	0,8146	0,1854
0,2	1,0000	0,0000	0,2	0,5489	0,4511
0,1	1,0000	0,0000	0,1	0,2833	0,7167
0	1,0000	0,0000	0	0,0177	0,9823

4.2.1.2. Cobertura Derivex

Como en este trabajo el objetivo de utilizar el mercado de futuros es para fines de cobertura y no de especulación al intentar generar ganancias adicionales, el mercado de derivados de commodities energéticos Derivex solo será utilizado para mitigar el riesgo de variación de precio ante la exposición en bolsa.

Las características del contrato de futuros para los periodos de estudio en este trabajo se asume que no hay costos contractuales, y no hay necesidad de sostenimiento de margen de cuenta debido a que no se analizará la liquidación diaria, ya que esta es igual a cuando solo se hace la liquidación de diferencia del precio en el día cuando se toma el contrato y el precio del día de vencimiento, como se demuestra en el anexo A.1.

Como se explicó anteriormente en la sección 3.3.1 la forma de calcular el valor óptimo de posición de cobertura cruzada que minimiza el riesgo o la varianza de los precios spot y futuros de las ecuaciones (3.3.5) a la (3.3.11). Ahora bien, el generador conoce el porcentaje de energía que protegerá la participación que tendrá en la bolsa de su capacidad total de acuerdo a los resultados de su portafolio basado en predicción y de la cantidad de energía al cual se asumió que será despachado durante todo el mes de estudio.

Anteriormente se anunció que en este trabajo se aplicaran los resultados del portafolio y la estrategia de cobertura a un generador de una capacidad de 50 MW con una producción de energía de 37,2 GWh/m (Giga-vatios por mes) en un mes de 31 días, y como la participación de energía eléctrica en bolsa para este periodo es completa debido a los ponderadores ($\alpha=1$ y $\gamma=0.5$) de la capacidad total del generador, la energía que se cubrirá en el mercado de futuros es 1,20 de la energía

para la metodología de cobertura cruzada, y de 1,00 para la cobertura directa, ya que como se mostró en la sección 3.3.2 el valor de esta cobertura siempre es la unidad.

En el mercado de futuros energéticos Derivex los contratos son del tamaño de 360 MWh [31], por lo cual, se necesitaran 103,33 contratos para cubrir 37,2 GWh y aproximando a un número entero se tendría 103 contratos de futuros que cubrirán 37,08 GWh en el caso de cobertura directa. En la cobertura cruzada se está cubriendo una cantidad de energía de 44,64 GWh para 124 contratos de futuros del mes de marzo, esto debido a que el valor óptimo de cobertura es 1,20. Los valores de cobertura directa y cruzada acabados de mencionar se pueden apreciar en la tabla 4.6 junto con la energía que se vendería en la bolsa y precio promedio obtenido durante todo el mes de marzo.

TABLA 4.6. COBERTURA DIRECTA Y CRUZADA MARZO 2012

Transacción en Bolsa		Futuros: Cobertura directa		Futuros: Cobertura cruzada	
Precio mensual (\$/kWh)	119,51	Contratos	103,33	b*	1,20
Generación (GWh/mes)	37,20	Número contratos	103	Contratos	123,84
Total (\$MM)	4445,64	Venta (\$/kWh)	105,50	Número contratos	124
		Liquidación (\$/kWh)	120,00	Venta (\$/kWh)	105,50
		Cobertura (GWh)	37,08	Liquidación (\$/kWh)	120,00
		Margen (\$/kWh)	-14,50	Cobertura (GWh)	44,64
		Total (\$MM)	-537,66	Margen (\$/kWh)	-14,50
				Total (\$MM)	-647,28

La estrategia de cobertura se inicia el primer día hábil del mes de marzo tomando una posición de venta de 103 futuros con cobertura directa y 124 con cobertura cruzada de energía al precio del primer día hábil, y se hace la liquidación financiera el último día hábil del mes de marzo, la cual corresponde al margen mostrado en la tabla 4.6 que es el cálculo de la diferencia del precio de venta del futuro y el precio de liquidación. No se debe confundir que se quiere mostrar la

eficacia de las dos metodologías de cobertura directa y cruzada, ya que cuando se deba hacer una estrategia de cobertura solo se hace con una sola metodología.

Finalmente después de hacer la estrategia de cobertura se hace el flujo de caja recibido en la bolsa que es la multiplicación del precio promedio de bolsa por la energía generada (tabla 4.6), y el dinero que se perdió o se recibió en el mercado de futuros que es el margen multiplicado con el tamaño de la energía comprometida en el contrato de futuros (tabla 4.6), y así determinar la tarifa neta al cual se vendió la energía durante el mes de marzo, ver tabla 4.7.

La tarifa neta a la que se vendió la energía durante todo el mes fue de 105,05 \$/kWh para cobertura directa y de 102,11 \$/kWh para la cobertura cruzada, donde el precio que se deseaba cubrir era el que se conocía al inicio de la negociación del contrato de futuros con vencimiento en el mes de marzo, dicho precio era de 105,50 \$/kWh que se encuentra en la tabla 4.6 que corresponde al precio de venta en el mercado de futuros.

TABLA 4.7. BALANCE DE LAS COBERTURAS DIRECTA Y CRUZADA MARZO 2012

Futuros: Cobertura directa		Futuros: Cobertura cruzada	
Bolsa (\$MM)	4445,64	Bolsa (\$MM)	4445,64
Futuros (\$MM)	-537,66	Futuros (\$MM)	-647,28
Neto (\$MM)	3907,98	Neto (\$MM)	3798,36
Generación (GWh/mes)	37,20	Generación (GWh/mes)	37,20
Tarifa Neta (\$/kWh)	105,05	Tarifa Neta (\$/kWh)	102,11

Al hacerse la comparación de las dos metodologías de cobertura, se observa que la cobertura directa tiene una diferencia de 0,45 \$/kWh con respecto al precio del primer día hábil del contrato de futuros de marzo que era de 105.50 \$/kWh que era el precio que se deseaba cubrir, en cambio la cobertura cruzada tiene una diferencia de 3,39 \$/kWh con el precio que se deseaba cubrir. Lo anterior significa

que es más eficiente la cobertura directa siendo ésta la que más se acerca a la cobertura completa del precio del futuro que se conocía en el momento de la negociación. Esta cobertura no se logra totalmente debido a que los contratos deben ser números enteros y estos no cumplen con la cantidad exacta de energía que se desea cubrir.

Y otra de las razones porque no se logra la cobertura totalmente se debe a que el precio de los futuros a través de su liquidación financiera en el mercado Derivex y las transacciones en bolsa, ya que el precio de los futuros en su vencimiento converge a su precio spot, siendo éste el precio promedio aritmético diario de la primera referencia de precio de bolsa TX1 acumulado durante el vencimiento del futuro, es decir, el precio spot al final del contrato del mes de marzo (o para un mes en particular) será el promedio aritmético de la versión TX1 que va acumulado desde el primer día hasta el último día de marzo de 2012, y por esta razón el precio de liquidación del futuro con vencimiento en marzo es muy cercano al precio promedio de bolsa durante este mes.

Este comportamiento de convergencia del precio del futuro del mes de marzo de 2012 con el precio spot en su vencimiento que se empezó a negociar desde el 3 de octubre de 2011 se muestra en la figura 4.3².

En los resultados mostrados en la tabla 4.6 se puede apreciar el precio promedio de bolsa de marzo que fue de 119,51 \$/kWh y el precio de los futuros en el primer día hábil de este mismo mes fue de 105,50 \$/kWh que es el precio que aproximadamente va cubrir la exposición en la bolsa. Esto quiere decir que el generador no salió favorecido porque pudo haber incrementado sus utilidades si

²Todos los precios de los contratos futuros de los meses marzo, mayo y junio de 2012, se empezaron a negociar a partir de los primeros días de octubre de 2011 en el mercado de derivados de commodities energéticos Derivex [23].

solo hubiera vendido la energía en la bolsa, sin embargo, logro mitigar el riesgo de variación de precios y establecer una tarifa según el valor del futuro y corroborado en la tabla 4.6.

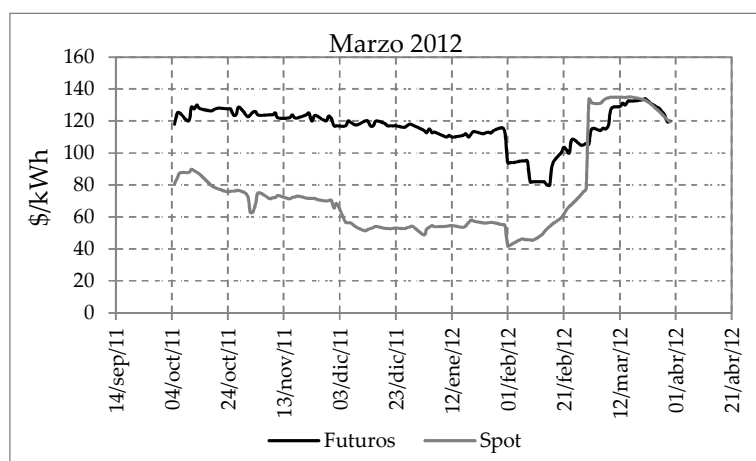


Figura 4.3. Convergencia del precio de los futuros de marzo y el precio spot

4.2.2. Mayo

4.2.2.1. Portafolio

Los resultados del modelo de Markowitz modificado se encuentran en la tabla 4.9, donde presenta una tendencia igual con respecto al periodo analizado anteriormente, cuando se fija el retorno ($\gamma=1.0$) y se varían los pesos del riesgo del valor de la unidad hasta el valor nulo, la participación en bolsa comienza aumentar, y para el caso cuando se deja fijo el riesgo ($\alpha=1.0$) y se hace la misma variación para los pesos del retorno empieza aumentar la participación en contratos.

TABLA 4.8. PORTAFOLIO DE MARKOWITZ MODIFICADO PERIODO MAYO 2012

	Bolsa	Contratos
Retorno esperado	0,0169	0,0028
Varianza retornos	0,0375	0.0005
Covarianza retornos	0,0015	

TABLA 4.10. PORTAFOLIO BASADO EN PREDICCIÓN PERIODO MAYO 2012

	Bolsa	Contratos
Predicción de precio	88,39 \$/kWh	118,28 \$/kWh
Predicción de retorno	0,5370	-0,0238
Varianza de error predicción retornos	0,0349	0,0005

TABLA 4.9. RESULTADOS PERIODO MAYO 2012 PORTAFOLIO DE MARKOWITZ MODIFICADO CON DIFERENTES PONDERACIONES

SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RIESGO			SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RETORNO		
$\gamma=1,0$			$\alpha=1,0$		
α	X_1	X_2	γ	X_1	X_2
1	0,1721	0,8279	1	0,1721	0,8279
0,9	0,1945	0,8055	0,9	0,1521	0,8479
0,8	0,2224	0,7776	0,8	0,1320	0,8680
0,7	0,2582	0,7418	0,7	0,1119	0,8881
0,6	0,3061	0,6939	0,6	0,0918	0,9082
0,5	0,3730	0,6270	0,5	0,0717	0,9283
0,4	0,4734	0,5266	0,4	0,0516	0,9484
0,3	0,6408	0,3592	0,3	0,0315	0,9685
0,2	0,9756	0,0244	0,2	0,0115	0,9885
0,1	1,0000	0,0000	0,1	0,0000	1,0000
0	1,0000	0,0000	0	0,0000	1,0000

TABLA 4.11. RESULTADOS PERIODO MAYO 2012 PORTAFOLIO BASADO EN PREDICCIÓN CON DIFERENTES PONDERACIONES

SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RIESGO DE PREDICCIÓN			SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RETORNO		
$\gamma=1,0$			$\alpha=1,0$		
α	X_1	X_2	γ	X_1	X_2
1	1,0000	0,0000	1	1,0000	0,0000
0,9	1,0000	0,0000	0,9	1,0000	0,0000
0,8	1,0000	0,0000	0,8	1,0000	0,0000
0,7	1,0000	0,0000	0,7	1,0000	0,0000
0,6	1,0000	0,0000	0,6	1,0000	0,0000
0,5	1,0000	0,0000	0,5	1,0000	0,0000
0,4	1,0000	0,0000	0,4	1,0000	0,0000
0,3	1,0000	0,0000	0,3	1,0000	0,0000
0,2	1,0000	0,0000	0,2	1,0000	0,0000
0,1	1,0000	0,0000	0,1	0,8060	0,1940
0	1,0000	0,0000	0	0,0154	0,9846

Los resultados del portafolio de predicción presentados en la tabla 4.11 también presentan un comportamiento similar a los del periodo de marzo, que se debe igualmente a que el retorno de predicción de los precios de bolsa sigue siendo superior al de los contratos, y solo en el caso que la sensibilidad del retorno sea nula se tendrá una participación considerable en contratos debido a que ese presenta un menor riesgo en la predicción del retorno.

Aunque en la predicción se tenga un riesgo debido a que no exista un predictor perfecto y se pueda seguir teniendo un riesgo por la respuesta del portafolio basado en predicción en cuanto a la participación en bolsa, ese riesgo se mitigará por medio de una estrategia de cobertura en el mercado de derivados de commodities energéticos ya que el objetivo de este trabajo es diseñar una estrategia de mitigación de riesgo para la venta de energía eléctrica.

4.2.2.2. Cobertura Derivex

Para el mes de mayo se tiene el mismo caso anterior y como se comentó en el periodo de marzo, la ponderación que se elegirá para la participación en bolsa y contratos será de ($\alpha=1$ y $\gamma=0.5$). Estos resultados se pueden apreciar en las tablas 4.12 y 4.13.

TABLA 4.12. COBERTURA DIRECTA Y CRUZADA MAYO 2012

Transacción en Bolsa		Futuros: Cobertura directa		Futuros: Cobertura cruzada	
Pr cio mensual (\$/kWh)	47,03	Contratos	103,33	b*	0,75
Generación (GWh/mes)	37,20	Número contratos	103	Contratos	76,99
Total (\$MM)	1749,56	Cobertura (GWh)	37,08	Número contratos	77
		Venta (\$/kWh)	95,00	Cobertura (GWh)	27,72
		Liquidación (\$/kWh)	45,00	Venta (\$/kWh)	95,00
		Margen (\$/kWh)	50,00	Liquidación (\$/kWh)	45,00
		Total (\$MM)	1854,00	Margen (\$/kWh)	50,00
				Total (\$MM)	1386,00

TABLA 4.13. BALANCE DE LAS COBERTURAS DIRECTA Y CRUZADA MAYO 2012

Futuros: Cobertura directa		Futuros: Cobertura cruzada	
Bolsa (\$MM)	1749,56	Bolsa (\$MM)	1749,56
Futuros (\$MM)	1854,00	Futuros (\$MM)	1386,00
Neto (\$MM)	3603,56	Neto (\$MM)	3135,56
Generación (GWh/mes)	37,20	Generación (GWh/mes)	37,20
Tarifa Neta (\$/kWh)	96,87	Tarifa Neta (\$/kWh)	84,29

En la tabla 4.13 se tiene el balance de las metodologías de cobertura, se puede apreciar que con la cobertura directa se obtiene una cobertura de 96,87 \$/kWh, la cual está ligeramente por encima del precio con una diferencia de 1,87 \$/kWh al que se deseaba cubrir, que es el precio del primer día hábil del mes de mayo que corresponde al precio de venta de 95,00 \$/kWh (ver tabla 4.12). En cambio en la cobertura cruzada se obtiene una diferencia mayor comparada con la directa, que para este caso es de 10,71 \$/kWh.

En el mes de mayo el comportamiento de los futuros fue diferente al del periodo anterior ya que el precio fue menor en el vencimiento que al de su precio en el primer día hábil del mismo mes, por tal razón se tuvieron ganancias en el mercado de futuros como se mostraron en la tabla 4.12.

Y en este caso el generador logra un beneficio porque las utilidades en la bolsa no son tan buenas, y al haber obtenido ganancias en el mercado de futuros logra un precio de cobertura de 96,87 \$/kWh que es cuando convergen los precios de los futuros y el spot como se observa en la figura 4.4.

Comparándose el comportamiento de los precios de futuros en este periodo, comparado con el anterior, en este caso se tuvo un baja de precio en el mercado Derivex caso contrario con el periodo de marzo, y en el precio de bolsa se tuvo una caída en los días en el vencimiento contrario al ocurrido al periodo de marzo en que presentaron una alza de precio.

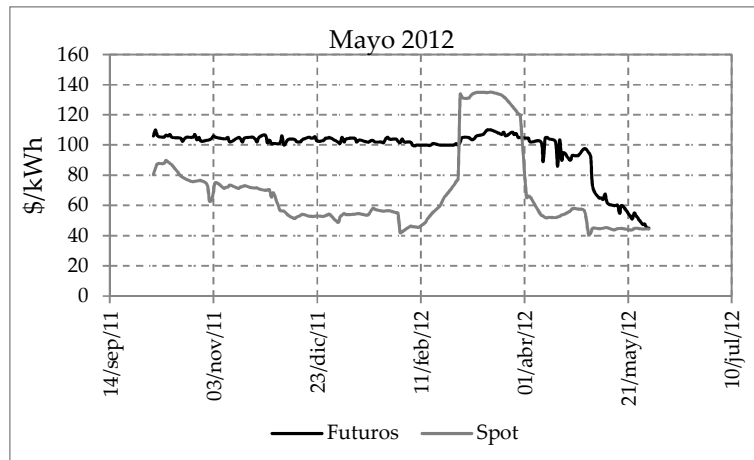


Figura 4.4. Convergencia del precio de los futuros de mayo y el precio spot.

4.2.3. Junio

4.2.3.1. Portafolio

Para terminar, se tienen los resultados del modelo de Markowitz modificado en las tablas 4.14 y 4.15, y para el modelo propuesto basado en predicción en las tablas 4.16 y 4.17. Estos resultados para este periodo presentan el mismo comportamiento de los periodos anteriores.

4.2.3.2. Cobertura Derivex

Para la cobertura de este periodo se deberá cubrir una cantidad de energía equivalente a 36 GWh/mes que corresponde a la venta en un mes de 30 días bajo los supuestos explicados anteriormente.

TABLA 4.14. PORTAFOLIO DE MARKOWITZ MODIFICADO PERIODO JUNIO 2012

	Bolsa	Contratos
Retorno esperado	0,0155	0,0028
Varianza retornos	0,0375	0,0005
Covarianza retornos	0,0015	

TABLA 4.16. PORTAFOLIO BASADO EN PREDICCIÓN PERIODO JUNIO 2012

	Bolsa	Contratos
Predicción de precio	56,87 \$/kWh	118,21 \$/kWh
Predicción de retorno	0,2094	-0,0205
Varianza de error predicción retornos	0,0383	0,0005

TABLA 4.15. RESULTADOS PERIODO JUNIO 2012 PORTAFOLIO DE MARKOWITZ MODIFICADO CON DIFERENTES PONDERACIONES

SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RIESGO			SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RETORNO		
$\gamma=1,0$			$\alpha=1,0$		
α	X_1	X_2	γ	X_1	X_2
1	0,1534	0,8466	1	0,1534	0,8466
0,9	0,1736	0,8264	0,9	0,1351	0,8649
0,8	0,1989	0,8011	0,8	0,1169	0,8831
0,7	0,2314	0,7686	0,7	0,0987	0,9013
0,6	0,2748	0,7252	0,6	0,0805	0,9195
0,5	0,3355	0,6645	0,5	0,0623	0,9377
0,4	0,4265	0,5735	0,4	0,0441	0,9559
0,3	0,5783	0,4217	0,3	0,0259	0,9741
0,2	0,8818	0,1182	0,2	0,0077	0,9923
0,1	1,0000	0,0000	0,1	0,0000	1,0000
0	1,0000	0,0000	0	0,0000	1,0000

TABLA 4.17. RESULTADOS PERIODO JUNIO 2012 PORTAFOLIO BASADO EN PREDICCIÓN CON DIFERENTES PONDERACIONES

SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RIESGO DE PREDICCIÓN			SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL RETORNO		
$\gamma=1,0$			$\alpha=1,0$		
α	X_1	X_2	γ	X_1	X_2
1	1,0000	0,0000	1	1,0000	0,0000
0,9	1,0000	0,0000	0,9	1,0000	0,0000
0,8	1,0000	0,0000	0,8	1,0000	0,0000
0,7	1,0000	0,0000	0,7	1,0000	0,0000
0,6	1,0000	0,0000	0,6	1,0000	0,0000
0,5	1,0000	0,0000	0,5	1,0000	0,0000
0,4	1,0000	0,0000	0,4	1,0000	0,0000
0,3	1,0000	0,0000	0,3	1,0000	0,0000
0,2	1,0000	0,0000	0,2	1,0000	0,0000
0,1	1,0000	0,0000	0,1	1,0000	0,0000
0	1,0000	0,0000	0	0,0140	0,9860

En la tabla 4.18 se presentan los resultados de las coberturas directa y cruzada. Y en la tabla 4.19 se tiene el balance de la cobertura del mes de junio. En este caso el precio de cobertura corresponde a un valor de 99,00 \$/kWh y se logran cubrimientos con la cobertura directa de \$99,26 \$/kWh y con la cruzada de 104,67 \$/kWh, con unas diferencias de 0,26 \$/kWh y 4,67 \$/kWh con respecto al precio objetivo de cobertura.

TABLA 4.18. COBERTURA DIRECTA Y CRUZADA JUNIO 2012

Transacción en Bolsa		Futuros: Cobertura directa		Futuros: Cobertura cruzada	
Precio mensual (\$/kWh)	87,51	Contratos	100,00	b*	1,46
Generación (GWh/mes)	36,00	Número contratos	100	Contratos	145,83
Total (\$MM)	3150,29	Cobertura (GWh)	36,00	Número contratos	146
		Venta (\$/kWh)	99,00	Cobertura (GWh)	52,56
		Liquidación (\$/kWh)	87,25	Venta (\$/kWh)	99,00
		Margen (\$/kWh)	11,76	Liquidación (\$/kWh)	87,25
		Total (\$MM)	423,18	Margen (\$/kWh)	11,76
				Total (\$MM)	617,84

TABLA 4.19. BALANCE DE LAS COBERTURAS DIRECTA Y CRUZADA JUNIO 2012

Futuros: Cobertura directa		Futuros: Cobertura cruzada	
Bolsa (\$MM)	3150,29	Bolsa (\$MM)	3150,29
Futuros (\$MM)	423,18	Futuros (\$MM)	617,84
Neto (\$MM)	3573,47	Neto (\$MM)	3768,13
Generación (GWh/mes)	36,00	Generación (GWh/mes)	36,00
Tarifa Neta (\$/kWh)	99,26	Tarifa Neta (\$/kWh)	104,67

Y en la figura 4.5 se tiene la convergencia del precio de los futuros con el precio spot, que en este caso se tiene un comportamiento diferente con respecto a los periodos anteriores que para este caso el precio de los futuros tuvo un comportamiento estable.

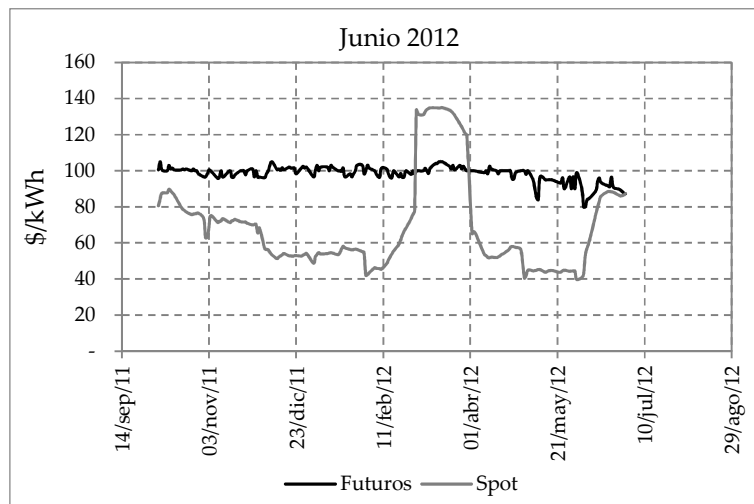


Figura 4.5. Convergencia del precio de los futuros de junio y el precio spot.

4.2.4. Comentarios generales acerca de los resultados numéricos

Los tres periodos analizados que correspondieron a los meses de marzo, mayo y junio fueron presentados con el objetivo de mostrar que aun presentándose diferentes tendencias que tomaron los precios de los contratos de futuros en los periodos analizados se lograron coberturas exitosas. Como fue el caso cuando los precios de los futuros en su vencimiento fueron mayores que al inicio del contrato en el periodo de marzo, o cuando en su vencimiento son menores que al inicio del contrato que fue el mostrado en mayo, o para el caso del periodo de junio en que el precio en el vencimiento fue muy cercano al del inicio del contrato.

De acuerdo a todos los escenarios o periodos donde se aplicó las metodologías de cobertura, la directa fue la que presentó mejores resultados, por tanto se puede dar crédito a la afirmación de los autores de [22] que recomiendan realizar coberturas directas cuando el activo que se desea cubrir es con futuros del mismo activo subyacente, como lo fue en el caso de este trabajo donde el activo que se deseaba cubrir era el precio de la energía eléctrica en bolsa a través de un contrato de

futuros donde su activo subyacente es el primer precio de referencia de bolsa de la energía eléctrica.

Por otro lado, uno de los comportamientos que se quería comprobar de acuerdo a la literatura que explica los mercados de futuros, es la relación entre oferta y demanda en el vencimiento de los contratos futuros, lo cual conduce a la convergencia del precio del futuro y del precio spot en su vencimiento y con esto evitar arbitraje por parte de los agentes del mercado. De acuerdo a esto, se observa que para el mercado de derivados de commodities energéticos Derivex el precio de los futuros efectivamente converge (en su vencimiento) al precio spot, como ocurrió en todos los periodos o escenarios realizados.

Los resultados numéricos también muestran que al conocerse las cantidades de participación en bolsa y contratos (del portafolio basado en predicción) la participación en bolsa queda expuesta a la variación de precio spot, razón por lo cual el generador queda expuesto a un riesgo. Por ende, se realiza una estrategia de cobertura en el mercado de derivados de commodities energéticos Derivex para protegerse de la exposición.

5. CONCLUSIONES

Este documento muestra como un productor de energía eléctrica en el mercado de energía eléctrica colombiano puede mitigar su riesgo para horizontes de tiempo mensual a través de una estrategia de tres etapas. La primera etapa es de predicción de precios con una red neuronal, y los resultados de esta son utilizados por una segunda etapa que consiste en la construcción de un portafolio basado en el modelo de Markowitz. Finalmente, una tercera etapa de cobertura en donde se muestra como mitigar el riesgo de exposición en el mercado de muy corto plazo utilizando futuros de electricidad. Vale la pena indicar que para la tercera etapa, el generador debe saber de antemano el porcentaje de su capacidad que será destinado al mercado de corto plazo, y esto efectivamente es conocido pues es parte de la solución del modelo Markowitz de la segunda etapa.

En la etapa de predicción se observó que la red neuronal es capaz de estimar el comportamiento de los precios como consecuencia de su entrenamiento. Aunque se presentaron errores de estimación por parte de la red, estos pueden ser disminuidos en trabajos futuros empleando alguna técnica híbrida que combine análisis fundamental con el análisis técnico del precio de la energía eléctrica.

La etapa del portafolio, la cual se basa principalmente en la predicción de la red neuronal, maximizaba el retorno y minimizaba el error de predicción basado en un modelo de Markowitz. En esta etapa igual se comparó el desempeño del modelo de optimización con el modelo clásico de Markowitz y se demostró que el portafolio basado en predicción superaba los resultados del modelo clásico. Incluso, si se mejora la etapa de predicción, como se sugiere en el párrafo anterior, el modelo de Markowitz basado en el pronóstico sería una herramienta invaluable

para los agentes de generación en el país.

En el capítulo de resultados numéricos también se evidencio que las coberturas realizadas son muy útiles para mitigar la exposición a la volatilidad de los precios de bolsa empleando el mercado de derivados (Derivex), la estrategia mostrada solo puede ser posible si hay un agente con una posición contraria a la de venta que realiza el generador. Sin embargo, en los actuales momentos, debido a la baja liquidez que ha presentado este mercado, como se observa en las operaciones diarias realizadas en los meses que se realizaron estas coberturas [23], la estrategia planteada podría presentar inconvenientes.

Aunque en este trabajo solo se implementó el punto de vista de una compañía de generación de energía, la construcción del portafolio y la estrategia de cobertura pueden ser fácilmente implementadas para una empresa de comercialización que atiende una demanda regulada, y poder bajar el costo de su energía en los contratos y mitigar su exposición en la bolsa en tiempo real.

Fue claro que el objetivo de diseñar una estrategia de mitigación de riesgo para un productor de energía eléctrica en el mercado eléctrico colombiano en un horizonte de tiempo mensual fue alcanzado. Sin embargo, quedan algunos aspectos a ser considerados con mayor detalle en futuros trabajos, entre otros aspectos: 1) mejorar la predicción, este aspecto es de hecho una temática independiente de investigación que requiere de mayor profundización, 2) considerar contratos bilaterales de diferentes duraciones pues este trabajo solo considera contratos mensuales, 3) considerar la probabilidad del despacho de un generador pues este trabajo considera que el generador atiende una demanda base y por lo tanto siempre es despachado, y 4) considerar los costos de transacción que fueron omitidos en los contratos y en el mercado de futuros.

Finalmente, la estrategia general de mitigación de riesgo desarrollada en este trabajo muestra una muy buena herramienta para el diseño de portafolios y toma decisiones para los agentes de generación del sector eléctrico colombiano. Igualmente, este trabajo contribuye a la escasa literatura de estrategias de mitigación aplicadas al caso colombiano toda vez que la mayoría de artículos de la literatura especializada se enfocan en otro tipo de mercados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. D. Freitas, A. F. de Souza, and A. R. de Almeida, "Prediction-based portfolio optimization model using neural networks," *Neurocomputing*, vol. 72, pp. 2170-562, Jun. 2009.
- [2] F. D. Freitas, A. F. de Souza, and A. R. de Almeida, "A Prediction-Based Portfolio Optimization Model," *Fifth International Symposium On Robotics and Automation - ISRA 2006*, pp. 520-525, Hidalgo Mexico, 2006.
- [3] Y. Cao, H. He, and R. Chandramouli, "A Novel Portfolio Optimization Method for Foreign Currency Investment," *Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN'09)*, pp. 439-435, 2009.
- [4] O. Ustunand and R. Kasimbeyli, "Combined forecasts in portfolio optimization: A generalized approach," *Computer & Operations Research*, vol. 39, no. 4, pp. 805-819, Apr. 2012.
- [5] R. A. Collins, "The Economics of Electricity Hedging and Proposed Modification for the Futures Contracts for Electricity," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2002.
- [6] L. L. Johnson, "The Theory of Hedging and Speculation in Commodity Futures," *Review of Economic Studies*, vol. 27, no. 3, pp. 139-151, Jun. 1960.
- [7] L. H. Ederington, "The Hedging Performance of the New Futures Markets," *The Journal of Finance*, vol. 34, no. 1, pp. 157-170, Mar. 1970.
- [8] E. Tanlapco, J. Lawarrée, and C. C. Liu, "Hedging With Futures Contracts in a Deregulated Electricity Industry," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 577-582, Aug. 2002.
- [9] R. Dahlgren, C. C. Liu, and J. Lawarrée, "Risk Assessment in Energy Trading," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 503-511, May. 2003.
- [10] J. D. Arias, D. F. Cardona, and H. Salazar, "Contract Price of a Bilateral Contract Using Risk Assessment: With application to Colombian wholesale electricity market," *2010 IEEE ANDESCON*, pp. 1-5, Sep. 2010.
- [11] M.F. de Oliveira, G.A.B. Arfux, and R.C.G. Teive, "Risk Management in the Commercialization Activity in Brazil – An Aprproach by Using Markowitz, VaR and CVaR," *Transmission & Distribution Conf. and Exp.: Latin America (TDC'06)*, pp. 1-6, 2006.
- [12] R. Bjorgan, C.C. Liu, and J. Lawarrée, "Financial Risk Management in a Competitive Electricity Market," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 1285-1291, Nov. 1999.
- [13] M. Liu and F. F. Wu, "Portfolio Optimization in Electricity Markets," *Electric Power System Research*, vol. 77, no. 8, pp. 1000-1009, Jun. 2007.
- [14] C. H. Wang and K. J. Min, "Short-Term Electric Power Trading Strategies for Portfolio Optimization," *The Engineering Economist*, vol. 53, no. 4, pp. 365-379, Dec. 2008.
- [15] N. P. Yu, A. Somani, and L. Tesfatsion, "Financial risk management in restructured wholesale power markets: Concepts and tools," *2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2010.

- [16] P. Areekul, T. Senjyu, H. Toyama, and A. Yona, "A Hybrid ARIMA and Neural Network Model for Short-Term Price Forecasting in Deregulated Market," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 524-530, Feb. 2010.
- [17] F. Villada, D. Cadavid, and J. D. Molina, "Pronóstico del precio de la energía eléctrica usando redes neuronales artificiales," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 44, pp. 111-118, Jun. 2008.
- [18] D. Singhal and K. S. Swarup, "Electricity Price Forecasting Using Neural Networks," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 550-555, Mar. 2011.
- [19] J. D. Velásquez, I. Dyner, and R. Castro, "¿Por qué es tan difícil obtener buenos pronósticos de los precios de electricidad en mercados competitivos?," *Cuadernos de Administración Bogotá (Colombia)*, vol. 20, no. 34, pp. 259-282, Jul.- Dic. 2007.
- [20] H. Markowitz, "Portfolio Selection," *The Journal of Finance*, vol. 7, no. 1, pp. 77-91, Mar. 1952.
- [21] D. G. Luenberger, *Investment Science*. New York Oxford: Oxford University Press, 1998, cap. 6.
- [22] J. C. Hull, *Options, Futures and other Derivatives*, 6th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005, cap. 1, 2, 3, and 4.
- [23] Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex. Información Histórica de Precios. [Online].
<http://www.derivex.com.co/NegociacionesdelDia/Paginas/InformaciondelMercado.aspx>
- [24] A. Delgado, *Inteligencia Artificial y Minirobots*.: ECOE Ediciones, 1998, cap. 1 y 2.
- [25] M. T. Hagan, H. B. Demuth, and M. H. Beale, *Neural Network Design*. Boston, MA: PWS Publishing, 1996, chap. 1, 2, 3, 4, 10, 11 and 12.
- [26] M. H. Beale, M. T. Hagan, and H. B. Demuth, *Neural Network Toolbox User's Guide R2012b*. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2012.
- [27] M. I. Acosta and C. A. Zuluaga, "Tutorial sobre Redes Neuronales Aplicadas a Ingeniería Eléctrica y su Implementación en un Sitio Web," Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Tesis Pregrado 2000.
- [28] Experto en Mercados XM. Servicio de información del Mercado Mayorista de Electricidad Neón. [Online]. <http://sv04.xm.com.co/neonweb/>
- [29] Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. Datos sobre variación anual del IPC. [Online].
http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=348&Itemid=76
- [30] Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex. (2012, Mayo) Memorias de Capacitaciones y Seminarios. Esquema de funcionamiento de un Miembro Negociador. [Online].
<http://www.derivex.com.co/Capacitaciones/Paginas/MemoriasdeCapacitacionesySeminarios.aspx>

- [31] Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex. (2010, Abril) Memorias de Capacitaciones y Seminarios. Característica y usos del Contrato de Futuro de Electricidad Mensual. [Online].
<http://www.derivex.com.co/Capacitaciones/Paginas/MemoriasdeCapacitacionesySeminarios.aspx>
- [32] Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG. (2007, Dic.) Resolución CREG119-2007. [Online].
[http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/c63f06a9114e1a150525785a007a6fa2/\\$FILE/Creg119-2007.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/c63f06a9114e1a150525785a007a6fa2/$FILE/Creg119-2007.pdf)
- [33] L. J. Cuadros and D. A. Ortega, "Derivex: Una Herramienta para Contratar la Energía de Consumo Industrial," Colegio de Estudios Superiores de Administración CESA, Bogotá, Tesis maestría 2012.
- [34] Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex. (2011, Marzo) Memorias de Capacitaciones y Seminarios. Modelo Operativo. [Online].
<http://www.derivex.com.co/Capacitaciones/Paginas/MemoriasdeCapacitacionesySeminarios.aspx>
- [35] Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex. Documentos de Normatividad. Reglamento General de Mercado de Derivex. [Online].
<http://www.derivex.com.co/Paginas/Normatividad.aspx>
- [36] Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex. (2012, Agosto) Documentos de Normatividad. Circular Derivex Actualizada. [Online].
<http://www.derivex.com.co/Paginas/Normatividad.aspx>
- [37] Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex. (2010, Mayo) Memorias de Capacitaciones y Seminarios. Modelo Operativo Derivex. [Online].
<http://www.derivex.com.co/Capacitaciones/Paginas/MemoriasdeCapacitacionesySeminarios.aspx>
- [38] Hoklie and L. R. Zuhail, "Resolving Multi Objective Stock Portfolio Optimization Problem Using Genetic Algorithm," *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, pp. 40-45, 2010.
- [39] Mercado de derivados de commodities energéticos Derivex. (2012, Mayo) Memorias de Capacitaciones y Seminarios. Modelos de precios de Energía Eléctrica en Colombia. [Online].
<http://www.derivex.com.co/Capacitaciones/Paginas/MemoriasdeCapacitacionesySeminarios.aspx>

ANEXOS

A. *MERCADO DE DERIVADOS DE COMMODITIES ENERGÉTICOS DERIVEX*

Los agentes del sector eléctrico colombiano para mitigar su riesgo solo contaban con los contratos bilaterales, y desde octubre de 2010 cuentan con un nuevo instrumento financiero para mitigación de riesgo que garantiza para todos los agentes el cumplimiento de las operaciones y los protege de la volatilidad del precio de electricidad. Este “*MERCADO DE DERIVADOS DE COMMODITIES ENERGÉTICOS DERIVEX*” hasta el momento solo opera con contratos futuros de electricidad, donde sus participantes pueden tomar posiciones de venta o de compra de electricidad como estrategia de especulación o cobertura a través de liquidaciones financieras, siendo la estrategia de cobertura la más atractiva o la finalidad del uso de los derivados energéticos [33], [34] y [31].

En este anexo se mostraran las características de los futuros de electricidad y el procedimiento de liquidación diaria y el cierre de la posición. Conceptos y características técnicas de operación que son utilizadas en las transacciones del mercado Derivex podrán ser profundizadas en [33] y [35]. Aspectos como los costos de transacción y los códigos que identifican los tipos de contratos de futuros de electricidad llamado nemotécnicos se encuentran en [35], [36] y [37].

A.1. *Características de los contratos futuros de electricidad en Derivex*

En la tabla 0.1 que fue tomada de [34] y [30] se presenta de forma resumida las características de los contratos de futuros de electricidad que se negocian en el mercado Derivex. Se puede apreciar en la tabla 0.1 que los contratos de electricidad

se podrían negociar con un vencimiento de un mes o de 13 meses adelante, con un tamaño de 360 MWh si se desea un contrato ELM o con un tamaño de 10 MWh si es el contrato ELS, en los cuales se debe hacer liquidación financiera de precios y pago de garantía diaria.

TABLA 0.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTRATOS DEL MERCADO DERIVEX

Activo subyacente	Corresponde al precio promedio aritmético acumulado de la primera referencia del precio bolsa (versión TX1) [31].
Cotización	La unidad de negociación es en pesos por kilovatio hora (\$/kWh).
Tamaño contrato ELM	360.000 kWh, 360 MWh ó 0,360 GWh
Tamaño contrato ELS	10.000 kWh, 10 MWh ó 0,010 GWh
Vencimiento	Mensual
Método de liquidación	Se hace liquidación diaria por diferencias de la operación de los contratos. Y en el vencimiento del contrato también se hace liquidación financiera, es decir, no hay entrega física del compromiso que se tenga en el contrato ya sea de venta/compra.
Último día de negociación	Se negocia cada contrato ya sea ELM o ELS hasta el último día hábil del mes de expiración.
Día de vencimiento del contrato	Los contratos ELM y ELS tienen vencimiento el segundo día hábil del mes siguiente al de expiración.
Vencimientos	Se tienen contratos con vencimientos disponibles en el mes actual y hasta 13 meses.
Garantías	Garantía exigida por la Cámara de Riesgo Central de Contraparte CRCC por toda operación realizada en el mercado Derivex. Los contratos con vencimiento en el mes actual y los tres meses siguientes será del 21%, para los vencimientos en 5, 6, 7 y 8 meses la garantía será del 16%, y para los contratos con vencimientos a 9, 10, 11, 12 y 13 meses la garantía será del 12% [34].

La garantía es un dinero exigido por la Cámara de Riesgo Central de Contraparte CRCC a cada una de las partes de los contratos pactados en el mercado Derivex. En la tabla 0.2 se muestra un ejemplo de cómo sería la liquidación financiera diaria y el valor de la garantía por parte del vendedor durante los días hábiles del mes de marzo de 2012.

TABLA 0.2. LIQUIDACIÓN FINANCIERA DE PRECIOS Y DE GARANTÍA DIARIA EN EL MERCADO DERIVEX

Día	Precio futuros (\$/kWh)	Valor posición (\$)	P&G (\$)	P&G acum. (\$)	Garantía (\$)	Cuenta garantías (\$)	Nivelación garantía (\$)	Cuenta garantías nivelada (\$)
1	105,50	37.980.000	0	0	7.975.800	7.975.800	0	7.975.800
2	115,00	41.400.000	-3.420.000	-3.420.000	8.694.000	4.555.800	4.138.200	8.694.000
3	114,00	41.040.000	360.000	-3.060.000	8.618.400	9.054.000	0	9.054.000
4	115,50	41.580.000	-540.000	-3.600.000	8.731.800	8.514.000	217.800	8.731.800

5	115,02	41.405.400	174.600	-3.425.400	8.695.134	8.906.400	0	8.906.400
6	117,50	42.300.000	-894.600	-4.320.000	8.883.000	8.011.800	871.200	8.883.000
7	127,75	45.990.000	-3.690.000	-8.010.000	9.657.900	5.193.000	4.464.900	9.657.900
8	129,00	46.440.000	-450.000	-8.460.000	9.752.400	9.207.900	544.500	9.752.400
9	131,10	47.196.000	-756.000	-9.216.000	9.911.160	8.996.400	914.760	9.911.160
10	130,00	46.800.000	396.000	-8.820.000	9.828.000	10.307.160	0	10.307.160
11	132,57	47.723.400	-923.400	-9.743.400	10.021.914	9.383.760	638.154	10.021.914
12	132,39	47.660.400	63.000	-9.680.400	10.008.684	10.084.914	0	10.084.914
13	133,15	47.932.200	-271.800	-9.952.200	10.065.762	9.813.114	252.648	10.065.762
14	133,92	48.211.200	-279.000	-10.231.200	10.124.352	9.786.762	337.590	10.124.352
15	132,69	47.768.400	442.800	-9.788.400	10.031.364	10.567.152	0	10.567.152
16	131,00	47.160.000	608.400	-9.180.000	9.903.600	11.175.552	0	11.175.552
17	127,98	46.072.800	1.087.200	-8.092.800	9.675.288	12.262.752	0	12.262.752
18	126,00	45.360.000	712.800	-7.380.000	9.525.600	12.975.552	0	12.975.552
19	124,00	44.640.000	720.000	-6.660.000	9.374.400	13.695.552	0	13.695.552
20	119,50	43.020.000	1.620.000	-5.040.000	9.034.200	15.315.552	0	15.315.552
21	120,00	43.200.000	-180.000	-5.220.000	9.072.000	15.135.552	0	15.135.552

En la tabla 0.2 se tiene nueve columnas, y comenzando de izquierda a derecha en la primera columna se especifica los días hábiles en que se negoció el contrato de futuros y en la segunda columna se muestran todos los precios de futuros que se presentaron durante el mes de marzo.

La tercera columna es el valor de la posición tomada, siendo esta la multiplicación del precio de los futuros presentados en cada día por el tamaño de los contratos tomados, que en este ejemplo será un solo contrato ELM de 360.000 kWh.

La cuarta columna corresponde a las pérdidas y ganancias liquidas en cada uno de los días negociados. Se calcula como la diferencia del valor de la posición del día anterior con el actual. Cuando se tiene una pérdida esta tiene un valor negativo dado que el precio actual es mayor que el del día anterior, esta diferencia del valor de posición anterior menos la actual se hace por el motivo de que se toma una posición de venta.

Lo anterior se debe a que diario se debe hacer la liquidación de diferencias del valor de las posiciones para determinar las pérdidas y ganancias durante el contrato. El valor de posición del día anterior es el ingreso por la venta del contrato, y el valor de posición actual es el egreso por la compra, y por tal motivo si el valor de posición de compra es mayor al de venta se tiene una pérdida, por el contrario, si se diera el caso en que el valor de posición de compra es menor al precio de venta se tiene una ganancia que se denota con un valor positivo.

En la quinta columna de la tabla 0.2 se tienen las pérdidas y ganancias acumuladas de todos los días de negociación que corresponden a la suma de todas las liquidaciones financieras diarias.

En la sexta columna se encuentra la garantía de cada una de las negociaciones del contrato, que equivale al 21% del valor de la posición que se encuentra en la tercera columna. Como se debe tener una cuenta de garantía o de sostenimiento como se explica en [22] cada una de las liquidaciones diarias afectan esta cuenta que se muestra en la séptima columna de la tabla 0.2.

Dado que si se tiene una ganancia esta se abona a la cuenta de garantía, pero si se tiene una pérdida esta se descuenta de la cuenta, por esta razón en algunos momentos será necesario hacer una nivelación de garantía como se presenta en la octava columna, donde cada uno de los valores de cada día de negociación es el valor del dinero que la parte con posición de venta debe adicionar para que la cuenta de garantía no vaya a quedar por debajo del valor de garantía diaria que obliga la CRCC que se especifica en la sexta columna.

Por tal razón, después de hacerse una nivelación de garantía cuando sea necesario se tiene la cuenta de garantía nivelada que se muestra en la última columna de la tabla 0.2.

TABLA 0.3. BALANCE DE LAS PÉRDIDAS Y GARANTÍAS	
Garantía inicial	\$ 7.975.800
Total nivelación de garantías	\$ 12.379.752
Total dinero depositado	\$ 20.355.552
Pérdidas acumuladas	\$ 5.220.000
Dinero depositado – pérdidas acumuladas	\$ 15.135.552
Devolución cuenta garantías	\$ 15.135.552

De la negociación del contrato de futuros del mes de marzo de 2012 se observó que se debe hacer un depósito de garantía inicial que va a la cuenta de garantías, y se hace una nivelación de garantía cada vez que esta cuenta se encuentre por debajo de la garantía que exige la CRCC en cada día de negociación debido a las pérdidas que se descuenten (o ganancias que se abonan) de esta cuenta.

En resumen, al inicio del contrato se realizó una garantía de \$7.975.800 y durante la negociación una nivelación total de \$12.379.752 dando un total depositado de \$20.355.552, que al hacer la diferencia de este total con las pérdidas acumuladas da un valor de \$15.135.552 siendo el mismo valor del dinero restante de la cuenta de garantías que deberá ser devuelto por parte de la CRCC. Dicho balance se muestra en forma más detallada en la tabla 0.3.

De la tabla 0.3 se observó que la cantidad total depositada en el contrato fue de \$20.355.552 y en el vencimiento fueron devueltos \$15.135.552 de la cuenta de garantías, obteniéndose una pérdida total de \$5.220.000. Si en caso de que no se tuviera en cuenta la liquidación diaria y las garantías como se mostró en la tabla 3.5.2 y solo se hiciera la liquidación en el vencimiento con los precios de futuros al

inicio y al final del contrato se obtendría el mismo valor de pérdidas como se encuentra en la tabla 0.4.

Por lo anterior, en los resultados de la cobertura en este trabajo no presentó la liquidación diaria ni se mostró la cuenta de garantías de cada contrato de futuros, dado que se pueden omitir al tenerse el mismo resultado de pérdidas y ganancias como si se hubiera tenido en cuenta.

TABLA 0.4. BALANCE DEL CONTRATO DE FUTUROS SIN LIQUIDACIÓN DIARIA

Contratos	1,00
Número contratos	1
Tamaño (GWh)	0,36
Venta (\$/kWh)	105,50
Liquidación (\$/kWh)	120,00
Margen (\$/kWh)	-14,50
Total (\$MM) ³	-5,22

Una de las razones del por qué se omite la cuenta de garantías es porque ésta es exigida por la CRCC para anular el riesgo de contraparte en caso de incumplimiento por una de las partes del contrato, pero como en este trabajo no se abordó este tipo de riesgos de crédito o de contraparte, fue omitida la cuenta de garantías en los contratos sin ningún error ya que el dinero que se sostiene en dicha cuenta es devuelto por la CRCC cuando se termina el contrato.

Y la razón por lo que se omite la liquidación diaria se debe a que la suma de todas estas liquidaciones es igual a cuando solo se hace la liquidación del precio en que inicia el contrato con el precio cuando se termina la negociación del contrato como se tiene en las ecuaciones (A.1) a (A.3).

³ \$MM: Abreviatura de millones de pesos

Esto se debe a que después de establecerse un contrato de futuros con una cantidad energía de venta a un precio de futuros en el día uno de negociación, se comenzara la liquidación financiera a partir del día dos con el precio del día anterior y el precio actual durante n días hasta llegar al día t , que este día t puede ser cuando se cierra posición o el día de vencimiento del contrato de futuros.

Por tanto, al sumarse todos estos precios como en la ecuación (A.2) se observa que todos se eliminan y solo queda la diferencia del precio del inicio del contrato y el día en que se termina (A.3). Y es por esta razón que se puede omitir la liquidación diaria y solo tenerse en cuenta la liquidación de los precios en el inicio y en el final del contrato sin ningún error.

$$P \& G = (P_{F,1} - P_{F,2})N_F + (P_{F,2} - P_{F,n})N_F \dots (P_{F,n} - P_{F,t-1})N_F + (P_{F,t-1} - P_{F,t})N_F \quad (A.1)$$

$$P \& G = (P_{F,1} - P_{F,2} + P_{F,2} - P_{F,n} \dots P_{F,n} - P_{F,t-1} + P_{F,t-1} - P_{F,t})N_F \quad (A.2)$$

$$P \& G = (P_{F,1} - P_{F,t})N_F \quad (A.3)$$

En dónde:

$$\begin{aligned} N_F &: \text{Cantidad de energía negociada en un contrato de futuros.} \\ P_{F,n} &: \text{Precio de futuros en el día } n. \\ t &: \text{Día del vencimiento del contrato de futuros.} \\ P_{F,t} &: \text{Precio de futuros en el día del vencimiento.} \end{aligned} \quad (A.4)$$